



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Kätlin Kruusla

**MAAKOORE LIIKUMISED RIIKLIKU GEODEETILISE
VÕRGU GNSS KORDUSMÕÕTMISTEST**

MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST IN ESTONIA BASED
ON GNSS MEASUREMENT CAMPAIGNS OF THE NATIONAL
GEODETIC REFERENCE NETWORK

Magistritöö
Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: lektor Tarmo Kall, *PhD*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Kätlin Kruusla		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Maakoore liikumised riikliku geodeetilise võrgu GNSS kordusmõõtmistest			
Lehekülgi: 110	Jooniseid: 23	Tabeleid: 21	Lisasid: 6
Õppetool: Geomaatika õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, Geodeesia P515			
Juhendaja: Tarmo Kall (PhD)			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2019			
<p>Töö eesmärgiks oli välja selgitada maakoore postglatsiaalsed liikumised riikliku geodeetilise võrgu (RGV) I klassi punktidel teostatud GNSS kordusmõõtmiste põhjal. RGV I klassi punktide staatilisi GNSS mõõtmiskampaaniaid tehti kolmel aastal: 1995, 2008 ja 2017. Nende mõõtmiste tulemusi võrreldes saab tuvastada RGV deformeerimise kiirust ja suunda. Töös kasutatavad GNSS mõõtmiste andmed on saadud Maa-ametilt. RGV I klassi punktide koordinaadid arvutati referentsraamistikus ITRF2008 ning selleks kasutati PPP-meetodit kasutavat teaduslikku tarkvara GIPSY-OASIS II (versioon 6.4). Arvutuste tulemusena saadi kolmest ajaepohhist koosnev punktide koordinaatide aegrida. Kiirused arvutati iga RGV I klassi punkti aegrea lineaarse trendi põhjal, kasutades kaalutud vähimruutude regressiooni meetodit. Selleks kasutati programme TSAalyzer ning MS Excel. Leitud kiiruste valideerimiseks võrreldi neid uuematest postglatsiaalsete maakoore liikumiste mudelitest NKG2016LU, NKG2016GIA, NKG_RF03vel, D1, ICE-6G_C(VM5a), interpoleeritud kiirustega ja riikliku GNSS püsijaamade võrgu ESTREF kiirustega. Lisaks arvutati kiirused kahe järjestikuse ajaepohhi (1997-2008 ja 2008-2017) vahel eraldi, et selgitada välja kiiruste võimalikku muutust ajas.</p> <p>Mõningad erinevused esinevad GNSS püsijaamade ning RGV I klassi punktide MISSO97, MÄEBE97 ja PEETSU97 kiiruste vahel, kuid üldiselt sobivad kiirused määramatuste piirides omavahel hästi. RGV I klassi punktide vertikaalkiiruste sobivus on parem GIA mudeliga D1 (standardhälve $\pm 0,36$ mm/a). Horisontaalkiiruste on sobivus parem mudeliga NKG_RF03vel (standardhälve N suunas $\pm 0,19$ mm/a ja E suunas $\pm 0,27$</p>			

mm/a). Selgus ka, et kahe järjestikuse ajaepohhi põhjal leitud kiiruste erinevused on statistiliselt olulised, mis tähendab et RGV I klassi punktide liikumiskiirused ei ole läbi aja olnud lineaarsed. Arvestades aegridade jääkhälbeid ja mudelitega sobivust hinnati lõplikeks kiiruste määramatusteks horisontaalsuunas $\pm 0,38$ mm/a ja vertikaalsuunas $\pm 0,41$ mm/a.

Märksõnad: GIPSY-OASIS, PPP-meetod, GIA, aegread

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kätlin Kruusla		Curriculum: Geodesy and Land Management	
Title: Movements of the Earth's crust in Estonia based on GNSS measurement campaigns of the National Geodetic Reference Network			
Pages: 110	Figures: 23	Tables: 21	Appendixes: 6
Chair: Chair of Geomatics			
Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering, Geodesy P515			
Supervisor: Tarmo Kall (PhD)			
Place and date: Tartu, 2019			
<p>The aim of this study was to determine postglacial movements of the Earth's crust based on GNSS measurement campaigns on National Geodetic Reference Network. In 1995, 2008, and 2017, static GNSS measurements of National Geodetic Reference Network first order points were carried out. Comparison of these measurements allows to detect the size and direction of deformation of the National Geodetic Reference Network. GNSS observation data were received from the Estonian Land Board. Observations were processed in the ITRF2008 reference frame using GIPSY-OASIS II (version 6.4) software which employs the PPP method.</p> <p>Obtained coordinates were combined into a time series consisting of three epochs. The velocities of National Geodetic Reference Network first order points were calculated with TSAlyzer and MS Excel based on the linear trend of each point, using weighted root mean squares regression method. To validate the results, they were compared with the velocities interpolated from postglacial land uplift (LU) and glacial isostatic adjustment (GIA) models NKG2016LU, NKG2016GIA, D1, ICE-6G_C(VM5a), and with the velocities of the national GNSS permanent station network ESTREF. In addition, velocities between two consecutive epochs (1997-2008 and 2008-2017) were calculated in order to establish possible change of the velocities in time.</p> <p>Although some differences exist between the velocities of the permanent GNSS stations and the National Geodetic Reference Network first order points MISSO97, MÄEBE97 and, PEETSU97, the velocities are generally consistent within the uncertainties. The</p>			

vertical velocities of the first order points fit better with the GIA model D1 (standard deviation of the residuals is $\pm 0,36$ mm/yr). Horizontal velocities fit better with the model NKG_RF03vel (standard deviation in N direction is $\pm 0,19$ mm/yr and in E direction $\pm 0,27$ mm/yr). It was also found that differences between the velocities of successive epochs are statistically significant, meaning that the velocities of National Geodetic Reference Network first order points have not been linear over time. Taking into account the time series' residuals and fit to the LU and GIA models, final velocity uncertainties in the horizontal direction ± 0.38 mm/yr and in the vertical direction ± 0.41 mm/yr were estimated.

Keywords: GIPSY-OASIS, PPP-method, GIA, time-series

SISUKORD

Lühendid	8
SISSEJUHATUS	11
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	13
1.1. Kaasaegne riikliku geodeetilise võrgu I klass ja selle kordusmõõtmised	13
1.2. PPP-meetodi põhimõte	22
1.3. Programmi GISPY-OASIS rakendamine koordinaatide arvutamisel	24
1.3.1. Programmi GIPSY-OASIS ülevaade	24
1.3.2. Täpsed orbiidid ja kellade parameetrid	24
1.3.3. Ionosfääri korrektsioon	25
1.3.4. Troposfääri korrektsioon	27
1.3.5. Antenni faasitsentri korrektsioon	30
1.3.6. Tahke Maa ja pooluse loodete korrektsioon	32
1.3.7. Ookeani loodete korrektsioon	33
1.3.8. Satelliidi signaali kaldenurgast sõltuv kaalumise	34
1.3.9. Koordinaatide referentsraamistik	35
1.4. Glatsioisostaatilise tasakaalustumise mudelid	37
2. MATERJALID JA METOODIKA	42
2.1. Kasutatud andmed ja andmete eeltöötlus	42
2.2. Andmetöötlus programmiga GIPSY-OASIS II	43
2.3. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide liikumiskiiruste leidmine	47
3. TULEMUSED JA ARUTELU	49
3.1. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide koordinaadid	49
3.2. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide liikumiskiirused	53
3.3. Tulemuste võrdlus varasemate uurimistulemustega	62
KOKKUVÕTE	69
KASUTATUD KIRJANDUS	71

LISAD	77
Lisa 1. 1997. a GPS mõõtmiskampaania erinevatest mõõtmisessioonidest arvatud topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegread riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kaupa.....	78
Lisa 2. 2008. a GPS mõõtmiskampaania erinevatest mõõtmisessioonidest arvatud topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegread riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kaupa.....	84
Lisa 3. 2017. a GNSS mõõtmiskampaania erinevatest mõõtmisessioonidest arvatud topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegread riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kaupa.....	90
Lisa 4. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 1997., 2008. ja 2017. a GNSS mõõtmiskampaaniate kombineeritud koordinaatide aegread ning jääkhälbed.....	96
Lisa 5. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide GNSS mõõtmiskampaaniate andmete põhjal arvatud ruumilised geotsentrilised ristkoordinaadid ITRF2008 referentsraamistikus ja nende standardhälbed (m)	108
Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	110

Lühendid

AIUB	Berni Ülikooli Astronoomiainstituut (<i>Astronomical Institute University of Bern</i>)
ANTEX	Antenni kalibreerimise andmete formaat (<i>Antenna Exchange Format</i>)
APPS	Automaatne täpse punkti asukohamääramise teenus (<i>The Automatic Precise Positioning Service</i>)
ARP	Antenni referentspunkt (<i>Antenna Reference Point</i>)
APC	Antenni faasitsenter (<i>Antenna Phase Centre</i>)
BIFROST	Fennoskandia jääaja järgse maatõusu, meretaseme ja tektoonika vaatluste projekt (<i>Baseline Inferences for Fennoscandian Rebound Observations, Sea Level and Tectonics</i>)
CODE	Euroopa orbiitide määramise keskus (<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>)
CSRS	Kanada ruumiline referentssüsteem (<i>The Canadian Spatial Reference System</i>)
DOF	Vabadusastmete arv (<i>Degrees of Freedom</i>)
DORIS	Prantsusmaa satelliitsüsteemi nimetus (<i>Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite</i>)
ECMWF	Euroopa ilmaprognooside keskus (<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>)
ETRS	Euroopa terestiline referentssüsteem (<i>European Terrestrial Reference System</i>)
EUREF	Rahvusvahelise geodeesiaühingu IAG (<i>International Association of Geodesy</i>) regionaalsete referentsraamistike Euroopa alakomisjon (<i>Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe</i>)
GIA	Glatsioisostaatiline tasakaalustumine (<i>Glacial Isostatic Adjustment</i>)
GIPSY	GNSS andmetöötlus tarkvara GIPSY-OASIS II (GNSS - <i>Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software package</i>)
GLONASS	Venemaa globaalne asukohamääramissüsteem

GNSS	Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GPT	Troposfääri mudeli ja kaardistusfunktsiooni nimi (<i>Global Pressure and Temperature</i>)
GPS	USA globaalne asukohamääramissüsteem (<i>Global Positioning System</i>)
GRACE	Satelliitmissioon gravitatsiooni ja kliima uurimiseks (<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>)
IERS	Rahvusvaheline Maa pöörlemisteenistus (<i>International Earth Rotation Service</i>)
IGS	Rahvusvaheline GNSS teenistus (<i>International GNSS Service</i>)
ITRF	Rahvusvaheline Terrestriline Referentsraamistik (<i>IERS Terrestrial Reference Frame</i>)
ITRS	Rahvusvaheline Terrestriline Referentssüsteem (<i>International Earth Rotation Service Terrestrial Reference System</i>)
JPL	Programmi GIPSY-OASIS II loonud ja satelliitide täpseid efemeride arvutava asutuse nimetus (<i>NASA Jet Propulsion Laboratory</i>)
NKG	Põhjamaade Geodeesia Komisjon (<i>Nordic Geodetic Commission</i>)
NNR	Referentsraamistiku suhtes pööramata lahendus (<i>No-Net Rotation</i>)
NR	Ilma kindla referentsraamistikuta lahendus (<i>Non-Fiducial</i>)
NRCan	Kanada Loodusressursside Amet (<i>Natural Resources Canada</i>)
NRMS	Normaliseeritud ruutkeskmise (<i>Normalized Root Mean Square</i>)
PCO	Antenni faasitsentri nihe (<i>Phase Center Offset</i>)
PGR	Postglatsiaalne maakoore tõus (<i>Postglacial rebound</i>)
P/N	Tootekood (<i>part number</i>)
PPP	Täpne punkti asukohamääramine (<i>Precise Point Positioning</i>)
PCV	Antenni faasitsentri variatsioon (<i>Phase Center Variation</i>)
RGV	Eesti riiklik geodeetiline võrk

RINEX	Vastuvõtjast sõltumatu GNSS andmete formaat (<i>Receiver Independent Exchange Format</i>)
RTK	Reaalaja kinemaatiline (<i>Real Time Kinematic</i>)
SINEX	Tarkvarast sõltumatu GNSS lahenduse formaat (<i>Solution Independent Exchange format</i>)
SLR	Satelliidi laserlokatsioon (<i>Satellite Laser Ranging</i>)
S/N	Seerianumber (<i>serial number</i>)
TEC	Ionosfääri täielik elektronitihedus (<i>Total Electron Content</i>)
TECU	Ionosfääri täieliku elektronitiheduse ühik (<i>Total Electron Content Unit</i>)
TEQC	GNSS andmetöötlus programmi nimi (<i>The Toolkit for GNSS Data</i>)
TSAAnalyzer	GNSS aegridade analüüsi programmi nimi (<i>GNSS Time Series Analysis Software</i>)
VMF1	Troposfääri mudeli ja kaardistusfunktsiooni nimi (<i>Vienna Mapping Function</i>)
WRMS	Kaalutud ruutkeskmise (<i>Weighted Root Mean Square</i>)

SISSEJUHATUS

GPS kampaaniaid (GPS – *Global Positioning System*, USA globaalne asukohamääramissüsteem) kasutati peamiselt enne püsijaamade ajastut, valdavalt 1991-2008 (Bingley, et al., 2001; Rayan, et al., 2010). GPS kampaaniaid on kasutatud tektooniliste rikete (Wu, et al., 2001), maavärinate ja vulkaanide (Yavasoglu, et al., 2010; Wendt & Dietrich, 2003), maakoore deformeerumise (Rayan, et al., 2010), maalihete (Cencetti, et al., 2000), merevee taseme (Bingley, et al., 2001), riigisestest maakoore deformatsioonide (Rontogianni, 2010) ja jääpankade uurimisel (King, et al., 2000).

Antud uurimuses keskendutakse Eesti 3D kiirusvälja määramisele riikliku geodeetilise võrgu (RGV) I klassi punktide (nimetatud ka aluspunktideks) GNSS mõõtmiste (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) põhjal. Kaasaegse RGV esimesed staatilised GNSS mõõtmised viidi läbi 1997. a juulis. Sellele järgnesid RGV I klassi punktide GNSS kordusmõõtmised aastatel 2008 ja 2017. RGV I klassi punktide liikumise kiiruseid 1997. ja 2008. a mõõtmiste põhjal on kirjeldanud Kollo (2010) ja Oja et al. (2014). Täpsema RGV I klassi mõõtmiskampaaniate kirjelduse leiab peatükist 1.1. Varasemalt on kasutatud RGV koordinaatide arvutusteks Berni Ülikooli astronoomiainstituudi (AIUB, *Astronomical Institute University of Bern*) loodud teaduslikku tarkvara Bernese.

Töö eesmärgiks on välja selgitada maakoore postglatsiaalsed liikumised RGV I klassi punktidel teostatud GNSS kordusmõõtmiste põhjal. Selleks kasutati staatiliste GNSS mõõtmiste kampaaniate tulemusi 1997., 2008. ja 2017. aastast. Töös kasutatud andmed on saadud Maa-ametilt. Uurimisülesanneteks on:

- i) arvutada RGV I klassi punktide koordinaadid iga GNSS kampaania keskmisel epohhil;
- ii) leitud koordinaatide põhjal määrata nende muutumise kiirus;
- iii) valideerida tulemused GNSS püsijaamade kiiruste ja postglatsiaalsete maakoore liikumiste mudelite põhjal.

Teema on aktuaalne, sest töö tulemused võimaldavad läbi RGV I klassi punktide koordinaatide ajaliste muutuste hinnata Eesti geodeetilise referentsraamistiku stabiilsust. Kõigi kolme kampaaniatulemusi võrreldes saab usaldusväärsemalt tuvastada riikliku geodeetilise võrgu võimaliku deformeerumise kiirust ja näha muutuse suunda. Samuti annavad töö tulemused täiendavat infot Eesti maakoore postglatsiaalsete liikumiste kohta.

Töö uudsus seisneb selles, et varem ei ole RGV I klassi punktide ümberarvutusi tehtud PPP-meetodil (PPP – *Precise Point Positioning*) teadusliku tarkvaraga GIPSY ehk GIPSY-OASIS (GNSS – *Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software package*).

GIPSY tarkvara paketti on kasutatud ka paljudes teistes GNSS mõõtmisandmeid kasutanud uuringutes (nt Rayan, et al., 2010; Duman & Sanli, 2019). Sisendina kasutatakse GIPSY-s RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) formaadis mõõtmisandmete faili. Tarkvara võimaldab kasutada koordinaatide arvutamisel erinevaid parameetreid. Arvutustes kasutakse JPL (*NASA Jet Propulsion Laboratory*) täpsete orbiitide ja kellade parameetreid, ionosfääri II järgu korrektsiooni, troposfääri modelleerimist, antenni faasitsentri korrektsiooni, tahke Maa- ja ookeani loodete mudeleid ja satelliidi signaali kaldenurgast sõltuvat kaalumist. Koordinaatide arvutamise referentsraamistikuna kasutati ITRF2008 (ITRF - *IERS Terrestrial Reference Frame*), sest arvutuste tegemise ajal ei olnud JPL veel arvutanud tagasiulatuvalt aastasse 1997 täpseid orbiite ning kellade parameetreid kõige uuemas referentsraamistikus ITRF2014. Täpsemalt leiab GIPSY arvutustes kasutatavate parameetrite ning mudelite kohta infot peatükkidest 1.3 ja 2.2.

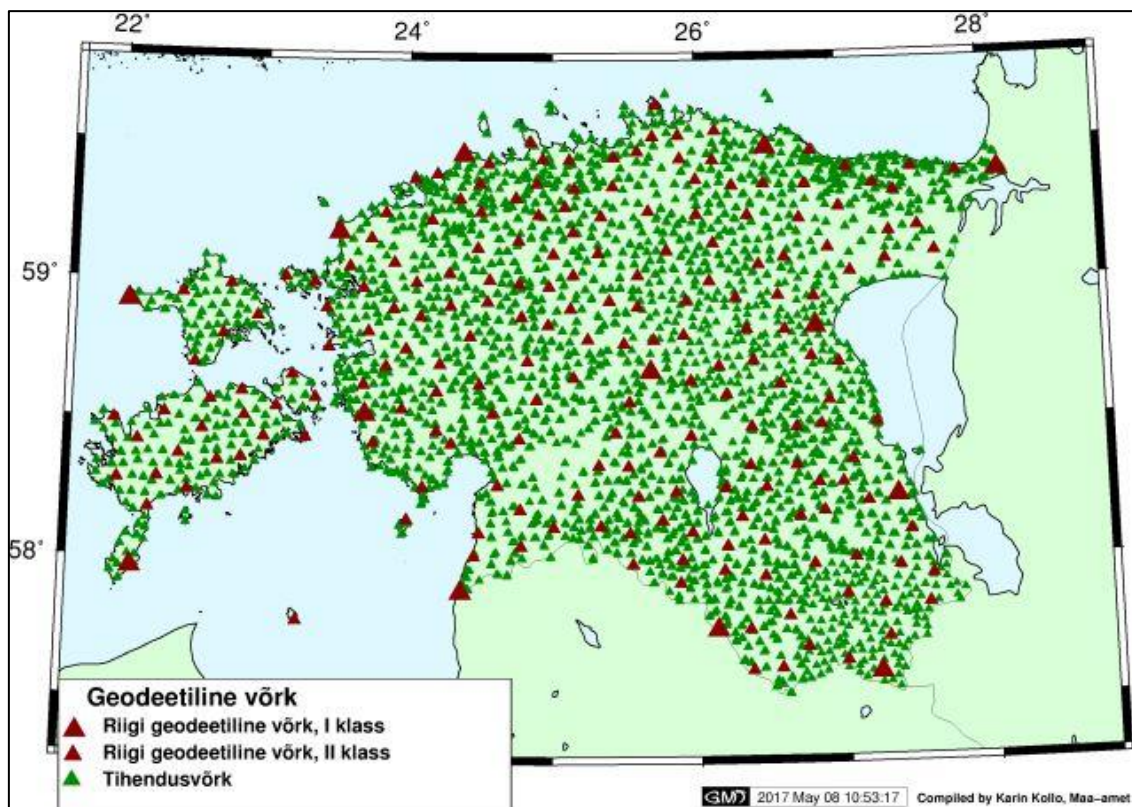
Punktide liikumiskiiruste leidmiseks kasutatakse programme MS Excel ja TSAlyzer (*GNSS Time Series Analysis Software*). Kolmest ajaepohhi keskmistest koordinaatidest koostatakse punkti koordinaatide aegrida (1997-2008-2017). Kiirused arvutatakse iga RGV I klassi punkti aegrea lineaarse trendi põhjal, kasutades kaalutud vähimruutude regressiooni meetodit. Leitud kiiruste valideerimiseks võrreldakse neid uuematest postglatsiaalsete maakoore liikumiste mudelitest, nagu NKG2016LU, NKG2016GIA, NKG_RF03vel, D1, ICE-6G_C(VM5a), interpoleeritud kiirustega ja riikliku GNSS-püsijaamade võrgu ESTREF kiirustega. RGV I klassi punktide liikumiskiiruste muutuste tuvastamiseks ajas arvutatakse kiirused kahe järjestikuse ajaepohhi 1997-2008 ja 2008-2017 ning 1997-2017 vahel. Kahe ajaepohhi põhjal arvutatud kiirusi võrreldakse omavahel, et tuvastada võimalikke kiiruste muutusi ajas ning neid kõrvutatakse ka lõplike 1997-2008-2017 kiirustega.

Lõputöös kasutatakse rahvusvahelist Harvardi viitamisstiili. Töö autor tänab Maa-ametit GNSS andmete eest. Uurimistööd toetati ETAG PUT1553 vahenditest.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Kaasaegne riikliku geodeetilise võrgu I klass ja selle kordusmõõtmised

Kaasaegse riikliku geodeetilise võrgu I klassi rajamist alustati 1996. aastal geodeetiliste märkide ehitamise ja paigaldamisega (Planserk, 1997). I klassi punkte on kokku 13, nendest üks on Suurupi GNSS-püsijaam (Joonis 1). Punktide keskmine vahekaugus on ~100 km. Mõõtmised viidi läbi 19.07.–28.07.1997. a kasutades suhtelise GPS mõõtmise meetodit. RGV I klass vastab Euroopa referentsraamistiku B klassi täpsusele (± 1 cm mõõtmisepohhil) ning see on EUREF (*European Reference Organisation for Quality Assured Breast Screening and Diagnostic Services*) võrgu tihenduseks Eesti alal (Rüdja, 2004).



Joonis 1. Riiklik geodeetiline võrk. I klassi punktid (13) on tähistatud suuremate purpurvärvi kolmnurkadega. (Maa-amet)

1997. aasta mõõtmistel kasutati Ashtech Z-12 tüüpi GPS vastuvõtjaid (Tabel 1) ja *Choke Ring* tüüpi GPS antennid (Tabel 2). Antenne ja vastuvõtjaid identifitseerivad *part number* (P/N) ja *serial number* (S/N) ehk eesti keeles tootekood ja seerianumber.

Tabel 1. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 1997. a mõõtmistel kasutatud GPS vastuvõtjad (Planserk, 1997)

GPS vastuvõtja ja tüüp	Tootekood P/N	Seerianumber S/N	Mälumaht (h)	Tarkvara versioon	Mobiilsus
Ashtech Z-12	700570-6	04298	120	1E81-1D01	ajutise püsijaamana
Ashtech Z-12	700570-1(B)	03623	18	1F00-1C72	liikuv
Ashtech Z-12	700570-1(B)	03625	18	1F00-1C72	liikuv
Ashtech Z-12	700570-1(B)	03630	18	1F00-1C72	ajutise püsijaamana
Ashtech Z-12	700570-1(B)	03643	18	1G00-1C73	liikuv
Ashtech Z-12	700845-1(E)	02676	18	1H00-1C73	ajutise püsijaamana
Ashtech Z-12	700845-1(E)	02684	18	1H00-1C73	liikuv
Ashtech Z-12	700570-3(C)	03175	60	1G00-1C73	ajutise püsijaamana
Ashtech Z-12	700570-3(C)	03176	60	1E81-1D01	ajutise püsijaamana
Ashtech Z-12	700570-3(C)	03436	60	1E81-1D01	ajutise püsijaamana

Tabel 2. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 1997. a mõõtmistel kasutatud GPS vastuvõtjate antennid (Planserk, 1997)

GPS antenni tüüp; tootjafirma	Tootekood P/N	Seerianumber S/N
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936	12267
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936	12269
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936	12276
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936	12279
<i>Dorne Margolin T</i> ; Allen Osborne	7490400-4	519
<i>Precise Reference</i> ; Ashtech	700936	11194
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936 (C)	11754
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936 (C)	11761
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936 (C)	11770
<i>Choke Ring</i> ; Ashtech	700936 (C)	13995

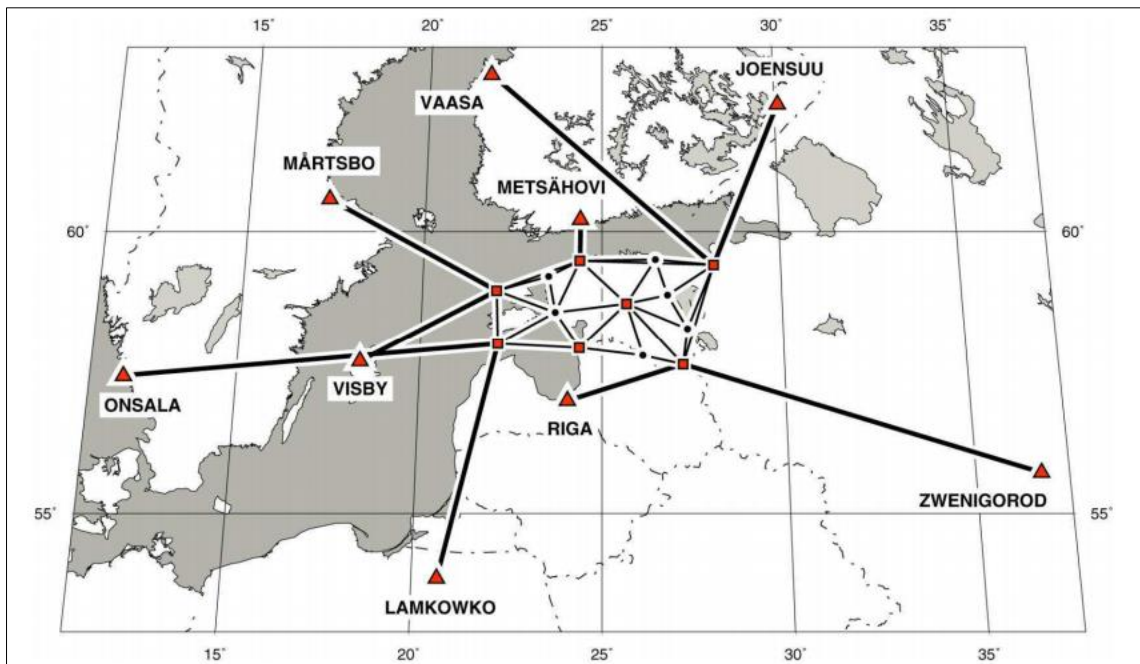
Selleks, et vältida GPS signaalide peegeldumist pargiti transpordivahendid mõõtmiste ajaks vähemalt 100 meetri kaugusele. Signaalide salvestamisel kasutati 30 sekundilist intervalli ning antenni löikenurgaks 10 kraadi. Meteoroloogilisi vaatlusi ei teostatud. Mõõteperioodiks loodi kuuest punktist ajutine püsijaamade võrk (6138, 5128, 6392, 6593, 4489, 6309, Tabel 1), teised vastuvõtjad liikusid ülejäänud punktide vahel (6267, 5312, 5402, 5288, 6494, 6426, 5459) vastavalt ajakavale. Vastuvõtjate mälumaht varieerus 18-120 tunnini. Suurema

mälumahuga vastuvõtjad paigutati püsijaamade punktidele. Mõõtesessioonid jagunesid 12 ja 24 tunnisteks ning mõõtmiste kogumahud varieerusid 60-204 tunnini (Tabel 3).

Tabel 3. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 1997. aasta GPS mõõtmiste kampaania mõõtmisandmete kogumaht (Planserk, 1997)

Punkti nimi	Punkti nr	GPS mõõtesessiooni pikkus	Mõõtmisandmete kogumaht (h)	Vastuvõtja seerianumber S/N
Kalana97	6138	24	204	03436
Suurupi GPS püsijaam97	6392	24	204	04298
Olgino97	6593	24	204	03175
Misso97	4489	24	204	03176
Kurla97	6309	12	204	03630
Mäebe97	5128	12	200	02676
Dirhami97	6267	12	121	03623/02684
Peetsu97	6426	12	132	03623
Londi97	5402	12	132	03643
Ikla97	5312	12	138	02684
Suursoo97	5459	12	138	03625
Ojaküla97	6494	12	60	03625
Paatsalu97	5288	12	66	03643

RGV arvutustel kasutati programme GLOBAL X POSITION SYSTEM ja Bernese GPS tarkvara versiooni 4.0 (Planserk, 1998). RGV I klassi punktide koordinaadid, arvutati Metsähovi, Onsala, Lamkowko, Riga, Zwenigorod, Vaasa, Joensuu, Visby ja Mårtsbo püsijaamade suhtes (Joonis 2) (Rüdja, 2004). Arvutused teostati ITRF96 referentsraamistikus ning RGV I klassi punktide koordinaadid teisendati ETRS89 süsteemi (ETRF96 raamistikus) (ETRF - *European Terrestrial Reference System*) kasutades EUREF-i väljatöötatud algoritmi ja transformeerimisparameetreid (Planserk, 1998).



Joonis 2. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktid, kus punased ruudud tähistavad 5 ööpäeva ning mustad täpid 2 ööpäeva pikkust mõõtmist. Koordinaatide arvutamisel kasutatud GNSS püsijaamad on tähistatud punaste kolmnurkadega. (Rüdja & Sander, 2013)

Mõõtesessioonide andmete kvaliteedikontroll viidi läbi kohe peale mõõtmisandmete saamist. Selleks on kasutati programmi TEQC (*The Toolkit for GNSS Data*) (Estey & Meertens, 1999). Lisaks kvaliteedikontrollile saab TEQC-is andmefaili kokku liita või sessiooni nõ tükeldada soovitud pikkusele, saab tuvastada vastuvõtja ostsillaatorite töö ebastabiilsuse ning muuta andmete intervalli (näiteks 10 sekundilised andmed 30 sekundilisteks). TEQC loeb RINEX formaadis andmeid, seega Ashtech originaalformaati vajab ümber konverteerimist RINEX formaati.

2008. aasta kordusmõõtmiste eesmärgiks oli:

- i) määrata Maa-ameti GPS püsivaatlusjaamadele Eesti geodeetilise koordinaatsüsteemi täpsed koordinaadid;
- ii) tuvastada RGV deformeerumise kiirus ja ulatus (Ellmann, 2008).

2008. aasta RGV I klassi kordusmõõtmistel (28.07-08.08. 2008) kasutati samu vastuvõtjaid ja antenne nagu 1997. a mõõtmistel (12 Ashtech GPS vastuvõtjate komplekti: Ashtech Z-12 GPS vastuvõtjad ja GPS *Choke Ring* antennid). Vastuvõtjate arv võimaldas mõõtmisi teha korraga 12 RGV punktis. Kasutatud antennid on loetletud Tabelis 4. Mõõtmisandmete kogumaht ulatus 68-161 tunnini (Tabel 5). Lisaks 12-le RGV punktile olid mõõtmistesse

lülitatud Suurupi, Kuressaare, Tõravere, Toila ja Audru püsijaamad. Arvutusteks kasutati Bernese GPS 5.0 tarkvara. (Ellmann, 2008)

Tabel 4. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 2008. a kordusmõõtmistel kasutatud GPS vastuvõtjate antennid (Ellmann, 2008)

GPS antenni tüüp; tootjafirma	Tootekood P/N	Seerianumber S/N
<i>Precise Reference; Ashtech</i>	700936	11194
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11959
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11754
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11963
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11761
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11770
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11772
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	11988
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	12276
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	12267
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	12279
<i>Choke Ring; Ashtech</i>	700936 (C)	12269

Tabel 5. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 2008. aasta GPS mõõtmiste kampaania mõõtmisandmete kogumaht ning kasutatud Ashtech Z-12 GPS vastuvõtjad (Ellmann, 2008)

Punkti nr	Mõõtmisandmete kogumaht (h)	Vastuvõtja		Tarkvara versioon	Vastuvõtja mälumaht (h)
		P/N	S/N		
6138	160	800070-01(A)	GP10273	CD00-1D02	124
6593	157	700570-6(C)	04293	CD00-1D02	124
4489	108	700845-6 (E)	LP00184U	CD00-1D02	124
6309	158	700570-6(C)	04300	CD00-1D02	124
5128	108	800035 (C)	LP02547	CD00-1D02	60
6267	158	700570-1(B)	03623	1K00-1D04	19,5
		700845-6 (E)	LP00184U	CD00-1D02	124
6426	103	700570-1 (B)	03625	1K00-1D04	19,5
5402	108	700570-6(C)	04098	1L00-1D04	124
5312	108	700845-6 (E)	LP00164U	CD00-1D02	124
5459	108	700845-6 (E)	LP00167U	CD00-1D02	124
6494	161	700570-1(B)	04298	CD00-1D02	104
		700845-1(E)	LP02684	1L00-1D04	19,5
		700845-6 (E)	LP00167U	CD00-1D02	124
5288	152	700570-1 (B)	03625	1L00-1D04	19,5
		700845-6 (E)	LP00164U	CD00-1D02	124

2008. aasta aruandes mainiti äikesetormi, mis võis mõjutada andmetöötlust punktides 6593 ja 6426 (kuupäeval 1.08.2008). 2008. aasta andmetest leiti TEQC-i kontrolliga mitmeteelisuse mõju kahes mõõtepunktiks (6494, 5288). Tegemist oli mõnetunniste

ajaperioodidega ning andmekvaliteedi parandamiseks vahetati nendes punktides vastuvõtjad. (Ellmann, 2008)

Kõik siiani tehtud GNSS mõõtmiskampaaniad toimusid Päikese 11-aastase aktiivsuse tsükli miinimum aastatel. 2017. aasta kampaania viidi läbi 7-15.08.2017 ning mõõtesessioonide pikkus varieerus 84-175 tunnini. Mõõtmised jaotati kahte mõõtesessiooni (Tabel 6). Esimene sessioon (07.08.-11.08.2017) kestis kokku 84 tundi ning teine sessioon (11.08.-15.08.2017) 91 tundi. 2017. aasta mõõtmiskampaania tehti geodeetilise võrgu stabiilsuse monitooringuks ning selleks, et siduda Eesti geodeetilise süsteemiga ESTREF GNSS püsijaamad. 01.01.2018 seisuga on ESTREF püsijaamad ja RGV I klassi punktid hierarhiliselt võrdsed, kuigi geodeetiliste punktide andmekogus on püsijaamad liigitatud RGV II klassi kuuluvaks. (Metsar, et al., 2018). Hiljutisel EUREF2019 sümpoosionil Tallinnas tunnistati aga Eesti GNSS püsijaamade võrgu lahendus A-täpsusklassi (± 1 cm igal ajahetkel) kuuluvaks.

Tabel 6. 2017. aasta riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide mõõtmiste sessioonidesse kuuluvus ning kasutatud antennid ja vastuvõtjad, IGS - *International GNSS Service* (Maaamet)

Punkti nimi	Punkti nr	Antenni IGS kood	Vastuvõtja IGS kood	Sessioon
Kalana97	6138	LEIAR25.R	GR25	I
Olgino97	6593	LEIAT504GG	GRX1200	II
Misso97	4489	LEIAT504GG	GRX1200	II
Kurla97	6309	LEIAT504GG	GRX1200	I
		LEIAR25.R	GR25	II
Mäebe97	5128	LEIAR25.R	GR25	I
Dirhami97	6267	LEIAT504GG	GRX1200	I
Peetsu97	6426	LEIAT504GG	GR25	II
Londi97	5402	LEIAT504GG	GRX1200	I
		LEIAT504GG	GRX1200	II
Ikla97	5312	LEIAT504GG	GRX1200	I
Suursoo97	5459	LEIAR25.R	GR25	II
Ojaküla97	6494	LEIAT504GG	GRX1200	II
Paatsalu97	5288	LEIAT504GG	GRX1200	I

2017. aasta RGV kordusmõõtmistel kasutati Leica antenni LEIAT504GG (*Choke Ring*) ja LEIAR25.R4 (*3D Choke Ring*) (Joonis 3). Vastuvõtjatena kasutati Leica tooteid GRX1200 ja GR25 (Joonis 4). Nimetatud antennid ja vastuvõtjad on oma tüübilt toodetud GNSS püsijaamades kasutamiseks. Vastuvõtjad salvestasid GPS ja GLONASS (Venemaa globaalne asukohamääramissüsteem) satelliitsüsteemide signaale ühesekundilise intervalliga 1-tunniste failidena. 1 punkti kohta koguti minimaalselt 76 tundi andmeid.

Mõõtmisandmete kvaliteedikontrolli tehti kaks korda: esimene kord 18 tundi peale seadmete käivitamist ja teine kord peale mõõtesessiooni lõppu. Kvaliteedikontrolliks kasutati programmi TEQC ning probleemseid olukordi ei esinenud. (Kollo, et al., 2017)



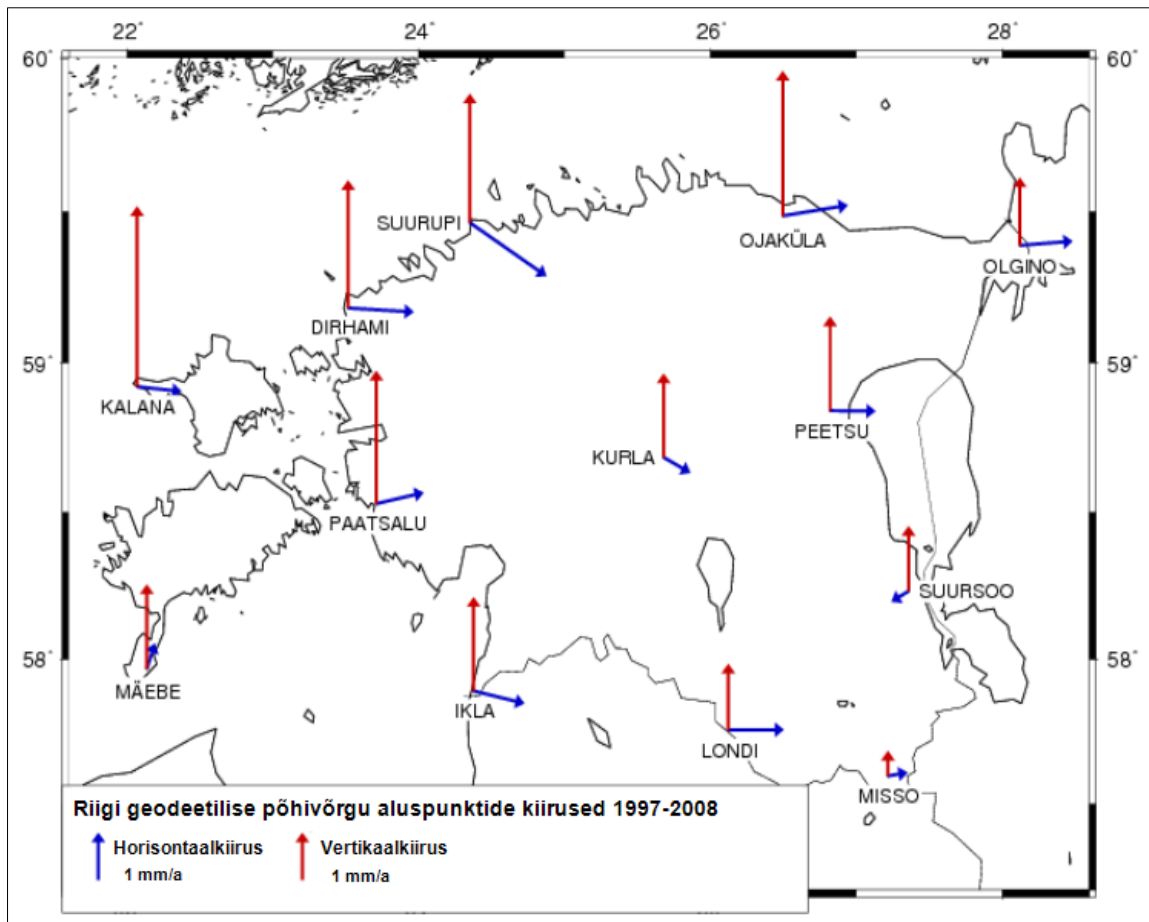
Joonis 3. Leica antennid LEIAR25.R4 ja LEIAT504GG. (Kollo, et al., 2017)



Joonis 4. Leica vastuvõtjad GRX1200 ja GR25. (Kollo, et al., 2017)

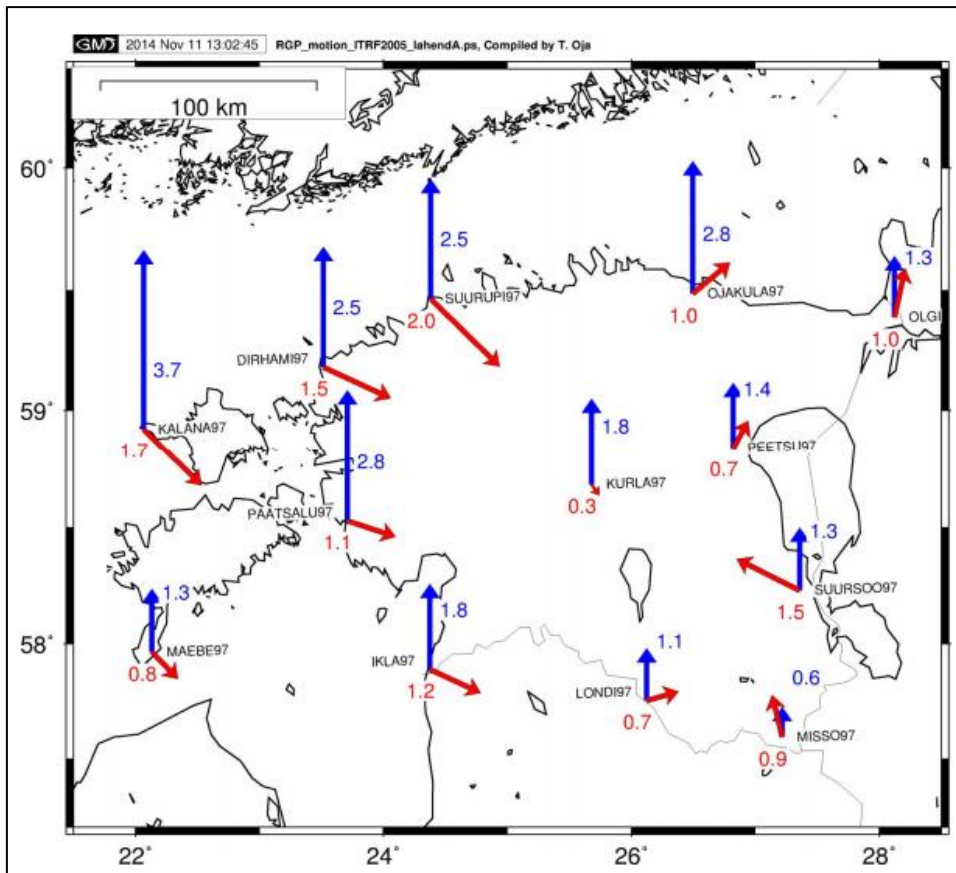
Kordusmõõtmiste üheks eesmärgiks oli tuvastada RGV deformeerumise kiirus ja ulatus. Varasemalt on geodeetilise võrgu GPS kordusmõõtmistest (1997. a ja 2008. a andmetest) maapinna liikumised arvutanud Kollo (2010) ja Oja, et al. (2014).

1997-2008 mõõtmiste põhjal Kollo (2010) leitud punktide liikumiskiirused on näha Joonisel 5. Mõõtmiskampaania keskmisel epohhil (2008,59) koodinaatide arvutamiseks kasutati IGS05 referentsraamistikku, L3 algoritmi (ionosfäärivaba lineaarkombinatsiooni) ja signaali lõikenurka 10 kraadi. Troposfääri kuiva osa mudelina kasutati Saastamoinen ning märja osa puhul Niell mudelit. Ookeani loodete koormuse mudelina kasutati mudelit FES2004 (Lyard, et al., 2006). Lõplikud koordinaadid transformeeriti ETRS89 süsteemi. (Kollo, 2010)



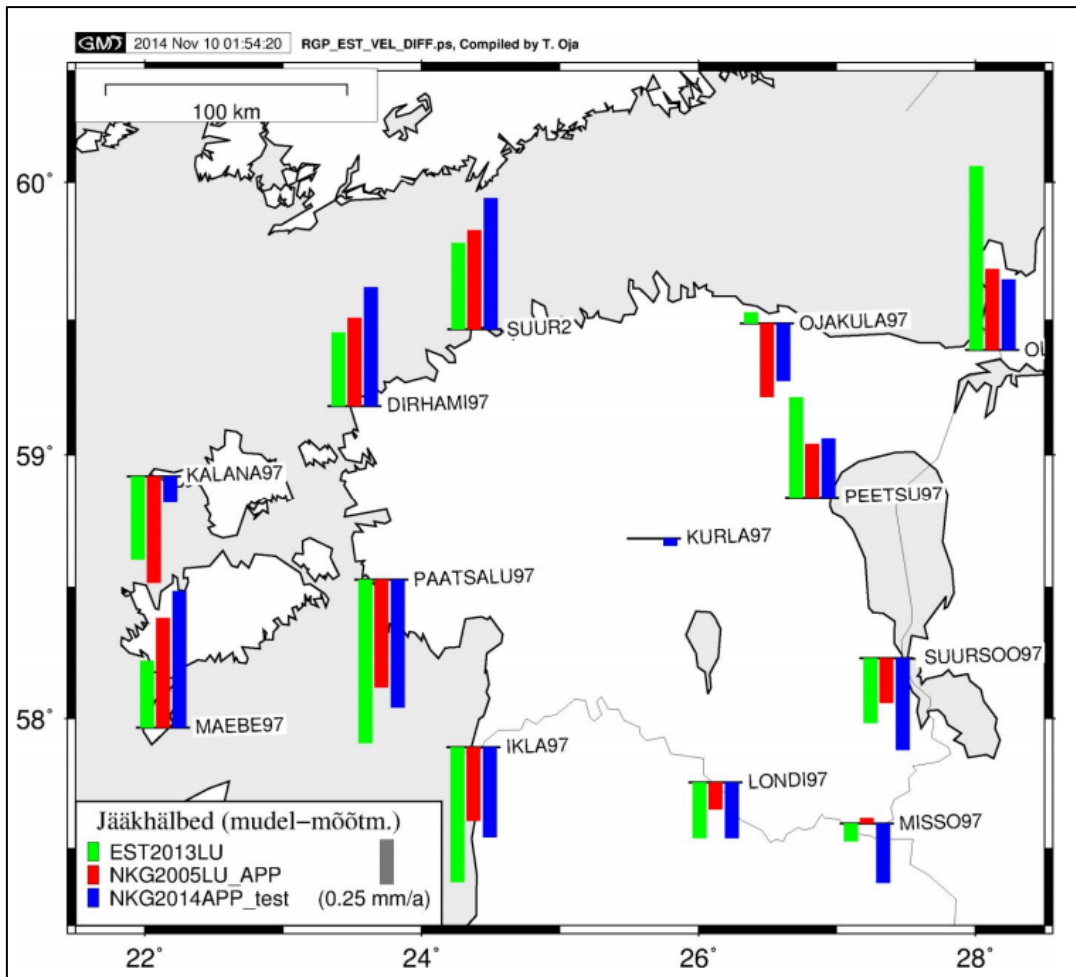
Joonis 5. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kiirused 1997-2008 (Kollo (2010) joonist eestikeelseks modifitseerinud K. Kruusla).

Oja, et al. (2014) uurimuses kasutatud 1997. aasta mõõtmistulemused olid arvutatud referentsraamistikus ITRF1996 ja 2008. a tulemused raamistikus IGS05. 1997. a koordinaadid teisendati samuti referentsraamistikku ITRF2005, et need oleks omavahel võrreldavad (Oja, et al., 2014). Sellises lahenduses võib esineda süstemaatilisi vigu, korrektsema tulemuse saamiseks peaks tegema juba koordinaatide arvutused ühtses süsteemis. Leitud RGV I klassi punktide vertikaalkiirused varieeruvad 0,60-3,70 mm/a ja horisontaalkiirused 0,3-1,7 mm/a, nendest kiirustest on laamtektoonikast tingitud liikumised eemaldatud (Oja, et al., 2014).



Joonis 6. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kiirusvektorid 1997-2008 arvutatuna L-EST97 koordinaatidest, referentsüsteemiks ITRF2005. Euraasia laama liikumise suurus on eemaldatud. Horisontaalsuunaline kiirusvektor on märgitud punase värviga ning vertikaalsuunalised kiirused sinise värviga, ühikuks mm/a. (Oja, et al., 2014)

Oja, et al. (2014) võrdles leitud vertikaalkiiruseid maatõusu mudelpindadega NKG2005LU, EST2013LU ja NKG2014LU_test. Jäähälvete jaotus RGV I klassi punktide kaupa on näha Joonisel 7. Parim sobivus oli mudeliga NKG2005LU ning halvim sobivus mudelitega EST2013LU ja NKG2014LU_test (Oja, et al., 2014). NKG2005LU_APP puhul olid suuremad jäähälbed lääne- ning kõige väiksemad kagu osas. Sama võib öelda ka NKG2014APP_test jäähälvete jaotumise kohta, kuid erinevused olid suuremad kui NKG2005LU_APP puhul.



Joonis 7. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide GNSS põhiste vertikaalliikumiste (1997-2008) jääkhälvete ruumiline jaotus võrdlemisel maatõusu mudelipindadega EST2013LU, NKG2005LU, NKG2014LU_test. (Oja, et al., 2014)

1997. ja 2008. aasta mõõtmiste koordinaatide ümberarvutused kasutades PPP-meetodi online kalkulaatoreid CSRS (*The Canadian Spatial Reference System*) ja APPS (*The Automatic Precise Positioning Service*) tegi Alnek oma magistritöös (Alnek, 2013). CSRS-i on loonud Kanada Loodusressursside Amet (NRCan - *Natural Resources Canada*) ning APPS-i JPL, mis põhineb GIPSY tarkvaral (Alnek, 2013).

1.2. PPP-meetodi põhimõte

PPP-meetod on GNSS andmetöötlusmeetod, mis kasutab täpseid satelliitide orbiidi ja kella parandite andmeid ning muid täpseid modelleerimisparameetreid, selleks et saada ainult ühe GNSS vastuvõtja mõõtmisandmete abil suure täpsusega punkti koordinaadid (Rizos, et al., 2012). Meetod muutus populaarsemaks peale globaalsete GNSS püsijaamade võrkude

loomist ning tänapäeval on võimalik kasutada juba reaajas PPP-mõõtmisi, alternatiivina reaalaaja kinemaatilistele (RTK) mõõtmistele (Ocalan, et al., 2016).

PPP-meetod on muutunud võimalikuks tänu täpsete satelliitide efemeriidide ja kella parandite arvutamisele mitmete organisatsioonide poolt (IGS, JPL, AIUB). Välja on töötatud mitmeid tarkvarapakette, mis on võimelised töötleva PPP-meetodil. Näiteks JPL poolt välja töötatud GIPSY-OASIS II; Bernese tarkvarapakett, mille on välja töötatud AIUB ja Calgary Ülikooli P³ tarkvarapakett. Kuigi PPP-meetod annab mitmesugustele rakendustele märkimisväärsed eelised seoses oma paindlikkuse ja kulutasuvusega, nõuab see pikemat mõõtmisaega enne kui saavutatakse asukoha optimaalse täpsus. (Cai, 2009)

Mitmed organisatsioonid, nagu IGS, JPL, CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*) ja NRCAN, arvutavad mitmeid tooteid, mida saab kasutada satelliitide orbitaalsete vigade vähendamiseks või kõrvaldamiseks. Tooted klassifitseeritakse nende latentsuse ja täpsuse järgi: ülikiire (*ultra-rapid*), kiire (*rapid*) ja lõplik (*final*). Lisaks satelliitide efemeriididele pakutakse ka teisi standardiseeritud tooteid (satelliitide ja jaamade kella parameetrid, ionosfääri ja troposfääri parameetrid). PPP-meetodi puhul kasutatakse ionosfääriliste vigade mõju vähendamiseks kahesageduslike GNSS vaatlusmudelid. (Ocalan, et al., 2016)

PPP-meetodi tüüpiline vaatluse mudel on kirjeldatud valemite 1.2.1 ja 1.2.2 (Héroux & Kouba, 2001):

$$l_p = \rho + c(dT - dt) + T_r + \varepsilon_p, \quad (1.2.1)$$

$$L_\phi = \rho + c(dT - dt) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\phi, \quad (1.2.2)$$

kus l_p on ionosfäärivaba kombinatsiooni pseudokaugus P1 ja P2 koodimõõtmistest. L_ϕ on kandelainete L1 ja L2 faaside ionosfäärivaba kombinatsioon, ρ on geomeetriline vahemaa satelliidi ja vastuvõtja vahel (m), c on valguse kiirus (m/s), dT ja dt on vastavalt satelliidi ja vastuvõtja kella nihked (sek), T_r on signaali viivitus troposfääris (m), N on ionosfäärivaba kombinatsiooni kandelaine faasi algundmatu (tsüklites), λ on kandelaine pikkus (m), ε_p ja ε_ϕ on vastavad mõõtmiste müra komponendid sisaldades signaali mitmeteelisust ning muid mudeldamata vigu.

PPP-meetodi täieliku saavutatava täpsuse saamiseks tuleb valemisse 1.2.1 ja 1.2.2 lisada täiendavaid liikmeid. Täiendavad liikmed parandavad mõõtmisandmeid Sagnac efekti, tahke

Maa loodete, atmosfääri ja ookeani loodete, Maa orienteerimise parameetrite, Maa pooluse liikumise ja teiste Maa deformatsioonide efektide, satelliidi ja vastuvõtja antennide faasisentrite nihke võrra. (Hofmann-Wellenhof, et al., 2008)

1.3. Programmi GIPSY-OASIS rakendamine koordinaatide arvutamisel

1.3.1. Programmi GIPSY-OASIS ülevaade

GIPSY-OASIS on tarkvarapakett, mille on välja töötanud JPL ning haldajaks on *Near Earth Tracking Applications and Systems* grupid. Tarkvarapakett võimaldab analüüsida mitmeid satelliitsüsteeme: GPS, GLONASS, DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*), SLR (*Satellite Laser Ranging*). GIPSY suudab GNSS positsioneerimise puhul tagada sentimeetri-tasemel täpsuse kosmose platvormidel, lennukitel, maapealsetel jaamadel (nii liikuva kui ka statsionaarsed) ning aja ülekandel (*time transfer*).

Tegemist on kõrgetasemelise kasutajaliidesega, mis toetab enamust täpse positsioneerimise rakendusi. Maapealsete uuringute puhul on seda võimalik kasutada mitmel otstarbel: maakoore deformatsioonid ning laamtektoonika uurimine, GNSS võrgud, jää liikumine, kliima uuringud (troposfääri ja ionosfääri mõõtmised), referentsraamistik ning Maa pöörlemise parameetrid. Lisaks on GIPSY-t võimalik kasutada ka lennukite asukohamääramiseks ning täpsete orbiitide kindlaksmääramiseks. (Jet Propulsion Laboratory, n.d.)

GIPSY-s rakendatakse punkti asukohamääramisel PPP-meetodit. Kõrge täpsuse saavutamiseks tuleb modelleerida väga erinevaid veaallikaid nagu näiteks satelliitide orbiidid ja kellade parameetrid, tahke Maa-, ookeani- ja pooluse looded, ionosfäär, troposfäär, jne. Arvutustes on võimalik kasutada staatiliste või kinemaatiliste GNSS mõõtmiste andmeid RINEX formaadis. Järgnevates peatükkides tutvustatakse GIPSY-s modelleeritavaid parameetreid lähemalt.

1.3.2. Täpsed orbiidid ja kellade parameetrid

Satelliidi orbiidi viga tähendab seda, et satelliidi tegelik positsioon ja selle arvutatud asukoht ei kattu. Selline erinevus on olemas tavaliselt kolmes orbiidi komponendis: mööda

trajektoori (*along-track*), risti sellega (*cross-track*) ning radiaalne. Orbiidi vea esinemisel on otsene mõju punkti asukohamääramisele. Satelliidi kella viga, mis on erinevus GPS ajastandardist, võib kirjeldada kella nihke, triivi ja triivi kiirusega. (Cai, 2009)

GIPSY-s on võimalik kasutada erinevates formaatides täpseid orbiidi ja kellade parameetreid. Kasutatavad formaadid sisaldavad teavet, mis võimaldab GIPSY tarkvaraga ühe vastuvõtjaga algundmatute lahendamist. Kasutada on võimalik *Fiducial*, *No-Net Rotation* (NNR) ja *Non-Fiducial* (NR) orbiidi ja kella toodete faile. *Fiducial* tähendab seda, et orbiitide andmed on antud mingis kindlas referentsraamistikus. Võimalik on kasutada lõplikku (*final*), kiiret (*rapid*) või ülikiiret (*ultra-rapid*) efemeriidide varianti. JPL satelliitide antennide kalibratsioonid on tootepakis YYYY-MM-DD.ant.gz failina. Tabelis 7 on näha GIPSY-s kasutatavate JPL täpsete efemeriidide 3D ruutkeskmised (RMS) täpsused, nende saadavus ning formaat. JPL on üks IGS-i analüüsi keskus, mis toetab kiire- ja lõpliku orbiidi ning kella prognoosi andmetega IGS-i. JPL toodete 3-D RMS täpsused varieeruvad 2,5 kuni 5 sentimeetrini. (Jet Propulsion Laboratory, 2014a)

Tabel 7. JPL arvutatud täpsed efemeriidid (Jet Propulsion Laboratory, 2014a)

Toode	Saadavus	3-D RMS täpsus (cm)
ülikiire	< 2 tundi	5
kiire	järgmisel päeval (16:00 UTC)	3,5
lõplik	< 14 päeva	2,5

NNR efemeriidid tähendavad, et satelliitide orbiite ei ole referentsraamistiku suhtes pööratud, saamas võib neid nihutada ja skaleerida. NF puhul ei ole orbiitide andmed konkreetse referentsraamistikuga seotud, raamistiku defineerivad satelliidid mõõtmise päeva seisuga. (Jet Propulsion Laboratory, 2014a)

NNR ja NF lahenduste puhul on võimalik kasutada ainult lõplikke täpseid efemeriiide. NF-i on mõistlik kasutada GNSS püsijaamade andmetöötlusel, kus on pikemad ja jätkuvad aegread, mis tähendab et andmeid ei pea iga kord, kui satelliitide efemeriidide referentsraamistik muutub, uuesti ümber arvutama, vaid need transformeeritakse ühtsesse süsteemi JPL-i arvutatavate nn x-failide abil.

1.3.3. Ionosfääri korrektsioon

Ionosfäär on atmosfääri kiht, mis asub Maa pinnast umbes 70-1000 km kõrgusel ja on GNSS signaalide jaoks dispersiivne keskkond (Dach, et al., 2015). Selles kihis ioniseerib Päikese

ultraviolettkiirgus aatomid ja molekulid. Ionosfääri kihis olevad vabad elektronid avaldavad tugevat mõju mikrolainesignaalide levikule (murdumine, peegeldus ja neeldumine). Kui GNSS signaalid liiguvad läbi ionosfääri, muutuvad nende signaalide kiirused ning seetõttu on vajalik teada signaali ionosfäärilist viivitust satelliidi ja kasutaja vahel (Cai, 2009).

Vabade elektronide mõju GNSS signaalidele on võrdeline elektronide tihedusega ionosfääris, mida kutsutakse täielikuks elektrontiheduseks (Seeber, 2003):

$$TEC = \int_S^R n_e(s)ds, \quad (1.3.1)$$

kus TEC tähistab täielikku elektrontihedust, s - kaugus, n_e – elektrontihedus (elektroni/m³). integraal annab elektronide koguarvu ristlõikepindalaga 1 m² silindris satelliidi S ja vastuvõtja R vahel.

Kandelaine faasi ionosfääris on ettepoole nihutatud (*phase advance*) arvestades, et kandjat moduleeriv signaal on ionosfääris viivitunud. Viivituse suurus on pöördvõrdeline faasi etenihkumisega. Seetõttu erinevad faasi- ja koodi pseudokaugused geomeetrisest vahemaast satelliidi ja vastuvõtja vahel ionosfääri refraktsiooni tõttu ühepalju, kuid vastasmärgiliselt. (Ögütcü & Kalayci, 2015; Seeber, 2003)

TEC mõõteühikuks on TECU (*Total Electron Content Unit*) (valem 1.3.2) (Seeber, 2003).

$$TECU = 1 \cdot 10^{16} \text{elektroni/m}^2 \quad (1.3.2)$$

Elektronide tihedus on suuresti varieeruv ja sõltub põhiliselt geograafilisest asukohast, kellaajast (hommik, lõuna, õhtu), aastaajast ning Päikse aktiivisusest. Ionosfääri varieeruvuse tõttu on seda ka keerukas modelleerida ning prognoosida. TEC mudeleid on kahte tüüpi: empiirilised mudelid, mis põhinevad vaatlusandmetel (IRI, Bent'i, Klobuchar'i, jt mudelid) ja füüsikalised mudelid (põhinevad printsiipidel). (Seeber, 2003)

Satelliitnavigatsioonis kasutamiseks on välja töötatud mitmed ionosfäärilised TEC mudelid. Rahvusvaheline referents ionosfääri mudel (IRI) on kõige populaarsem. IRI on empiiriline ionosfääri mudel, mis põhineb ionosfäärse plasma eksperimentaalsel vaatlemisel mõõtmiste abil. IRI mudeli täpsus konkreetsetes piirkonnas või ajavahemikul sõltub vaatlusandmete kättesaadavusest, kuna see on andmepõhine mudel. IRI mudel kirjeldab elektrontihedust, elektronide temperatuuri, ionide temperatuuri, ionide koostist ja elektronide sisaldust teatud asukoha, aja ja kuupäeva jaoks kõrgusel vahemikus 60 kuni 2000 km. (Grynyshyna-Poliuga, et al., 2015)

Esimese järgu ionosfääri refraktsiooni saab ionosfääri hajutava olemuse tõttu kahesageduslike mõõtmiste lineaarkombinatsiooniga täielikult kõrvaldada, kuid teise ja kolmanda järgu jääkefektid on selles lähenemisviisis korrigeerimata. (Hoque & Jakowski, 2007)

Esimese järgu ionosfääri mõju eemaldatakse kasutades ionosfääri vaba kombinatsiooni (Kedar, et al., 2003):

$$L_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2, \quad (1.3.3)$$

kus f_1 ja f_2 tähistab GPS sagedusi, L_1 ja L_2 on mõõdetud koodi- ja faasi pseudokaugused.

GIPSY-s on võimalus rakendada ka II-järgu ionosfääri korrektsiooni (I_2). Kõrgema järgu korrektsiooni kasutamine võimaldab arvestada ka signaali murdumisnäitaja sõltuvust magnetväljast. Faasi- ($I_{2_{ph,f}}$) ja koodimõõtmistel ($I_{2_{gr,f}}$) arvutakse I_2 valemite 1.3.4 ja 1.3.5 järgi (Subirana, et al., 2013a):

$$I_{2_{ph,f}} = -\frac{7527}{2f_1^3} \int_R^S N B_0 \cos \theta_B dL, \quad (1.3.4)$$

$$I_{2_{gr,f}} = -2I_{2_{ph,f}}, \quad (1.3.5)$$

kus θ_B on nurk Maa magneetilise välja B_0 vahel vastavalt signaali suunale, c on valguskiirus vaakumis, N on elektronide tiheduse number ja $\int N dL$ tähistab TEC väärtust liikudes mööda GPS signaali teed.

Lõpuks arvutatakse konkreetse mõõtmistüübi (faasi või koodi) puhul II-järgu korrektsioonid iga sageduse kohta ning lahutatakse mõõdetud väärtusest.

1.3.4. Troposfääri korrektsioon

Troposfäär ehk neutraalne atmosfäär on madalam osa atmosfäärist ning asub Maa pinnast ligikaudu kuni 60 km kõrgusel. Signaali levik troposfääris on mõjutatud temperatuurist, rõhust ja atmosfääri veeauru sisaldusest erinevates kihtides. Troposfäär on hajutav keskkond optiliste lainepikkuste juures. Mikrolaine ei ole neutraalses atmosfääris hajuv, st selle mõju ei saa GNSS signaalide lineaarkombinatsioonist hinnata, nagu ionosfääri puhul. Troposfääri mõju on rohkem oma geograafilise asukohaga seotud kui ionosfääril, seda põhjusel et troposfäär on Maa pinnale lähedamal ning kihtide varieeruvus on suurem. Põhiliseks GNSS

koodi- ja faasimõõtmiste signaali täpsuse piirajaks on troposfäär. Soovitud korrektse signaali saamiseks kasutatakse troposfääri korrektsioone: troposfääri mudel, seniidisuunaline viivitus, kaardistusfunktsioon, nominaalne troposfäär, troposfääri gradiendid ja neutraalse atmosfääri kuiv ja märg osa. (Dach, et al., 2015; Subirana, et al., 2013a)

Signaali viivitus T_s troposfääris on (Dach, et al., 2015):

$$T_s = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N^{trop} ds, \quad (1.3.6)$$

kus n on murdumisnäitaja ja N^{trop} on troposfääri refraktsioon.

GIPSY-s on võimalik arvutada refraktsioon troposfääri märja ja kuiva (hüdrostaatilise) komponendi kohta eraldi:

$$N^{trop} = N^{kuiv} + N^{märg} \quad (1.3.7)$$

Hüdrostaatilise ehk kuiva komponendi viivituse põhjustavad troposfääris olevad kuivad gaasid. Selle mõju varieerub sõltuvalt kohalikust temperatuurist ja atmosfäärirõhust, mis on prognoositav. Kuiva komponendi poolt tekitatud viga on umbes 2,3 meetrit seniidi suunas ja ligikaudu 10 meetrit madalamate kaldenurkade puhul. Märja komponendi viivitus on tingitud veeaurust ja kondenseerunud veest (pilved). Antud komponent on suuresti mõjutatud ilmastikutingimustest. Viivitus jääb tavaliselt mõnekümne sentimeetri piiresse, kuid see varieerub kiiremini kui hüdrostaatiline komponent ja üsna juhuslikult, mis teeb märja komponendi viivituse modelleerimise keerukamaks. (Subirana, et al., 2013b)

Troposfääri viivitus (T_s) sõltub teekonna pikkusest, mida signaal on läbinud neutraalses atmosfääris, ning sõltub seega ka satelliidi kaldenurgast e . Seda sõltuvust kirjeldatakse troposfääri viivitusega seniidi suunas T^0 kasutades nn kaardistamisfunktsiooni $f(e)$ (Dach, et al., 2015):

$$T_s = f(e) T^0 \quad (1.3.8)$$

Kaardistamisfunktsiooni ülesanne on projekteerida troposfääri seniidisuunaline viivitus satelliidi signaali kaldenurgale vastavaks (Hofmann-Wellenhof, et al., 2008).

Kaardistamisfunktsioon on signaali asimuudist sõltumatu ning on määratud märja ja kuiva osa kohta eraldi sobitades koefitsiente a , b ja c (valemis 1.3.9) (Marini, 1972):

$$f(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin e + \frac{a}{\sin e + \frac{b}{\sin e + c}}} \quad (1.3.9)$$

Kaardistamisfunktsiooni võib põhimõtteliselt defineerida ka kui neutraalse atmosfääri paksuse näitajat. Vaadates valemit 1.3.9 on kõige määravam koefitsient a . Diskreetsete kaardistamise funktsioonide puhul sisaldub numbriliste ilmamudelite informatsioon koefitsiendi a väärtuses ning b ja c põhinevad empiirilistel funktsioonidel. Empiiriliste kaardistamise funktsioonide puhul on ka a koefitsient empiiriline. (Landskron & Böhm, 2018)

Programmis GIPSY on võimalik kasutada kahte programmisest troposfääri kaardistusfunktsiooni: Niell ja GPT (*Global Pressure and Temperature*). Niell'i kaardistamisfunktsioon kasutab sisendina ainult vastuvõtja geograafilist asukohta ja mõõtmise aega, ning ei vaja maapinnal mõõdetud meteoroloogilisi andmeid (Subirana, et al., 2012). GPT on empiiriline mudel, mille sisendparameetriteks on jaama koordinaadid ja kuupäev, mis võimaldab parameetrite iga-aastaste variatsioonide modelleerimist (Boehm, et al., 2007). Võimalik on kasutada ka nõ programmiväliseid kaardistamisfunktsioone, need tuleb kasutamiseks alla laadida ning näidata andmetöötlusel selle asukoht.

Antud uurimustöös on kasutatud Vienna Mapping Function (VMF1) kaardistamisfunktsiooni ja sellega seotud troposfääri märja osa seniidiisuunalise viivituse a *a priori* mudelit (Boehm & Schuh, 2004; Böhm, et al., 2006). Tegemist on diskreetse troposfääri viivituse mudeliga. Diskreetne mudel põhineb numbrilistel ilmamudelitel, kus väärtused varieeruvad olenevalt kohast ja ajast. Empiirilised mudelid põhinevad klimatoloogilisel informatsioonil ning nende täpsust loetakse madalamaks. Diskreetseid andmeid antakse kindlatel numbriliste ilmamudelite epohhidel (00, 06, 12 ja 18 UT). VMF1 põhineb *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) numbrilisel ilmamudelil ning on kasutatav globaalse võrgustikuna $2,5^\circ \times 2,0^\circ$ või ka mudelis antud kindlates asukohtades (Landskron, 2018).

Lihtsustatult koosneb troposfääri refraktsiooni modelleerimine kolmest komponendist: a *a priori* mudelist, hinnatavast mudelist ja horisontaalsetest gradientidest (Dach, et al., 2015):

$$T_k^i(t, A_k^i, z_k^i) = {}^{apr}T_k(t, z_k^i) + {}^hT_k^0(t)f(z_k^i) + {}^nT_k(t)\frac{\partial f}{\partial z}\cos A_k^i + {}^eT_k(t)\frac{\partial f}{\partial z}\sin A_k^i, \quad (1.3.10)$$

kus T_k^i on troposfääri kogu viivitus jaama k ja satelliidi vahel i , t on mõõtmise aeg, z_k^i ja A_k^i on satelliidi i seniitkaugus ja asimuut jaama k suhtes. ${}^{apr}T_k(t, z_k^i)$ on signaali viivitus vastavalt satelliidi seniitkaugusele *a priori* mudeli järgi ning ${}^hT_k^0(t)f(z_k^i)$ on ajast sõltuv seniidisuunaline troposfääri viivitus ja selle kaardistamisfunktsioon. ${}^nT_k(t)$ ja ${}^eT_k(t)$ on ajast sõltuvad horisontaalsed troposfääri põhja- ja ida-suunalise gradiendi parameetrid.

Troposfääri viivitus ja kaardistamise funktsioon võivad sõltuda jaama asukohast, aastast ja päevast. Jagades valemi 1.3.10 vastavalt valemile 1.3.7 märjaks ja kuivaks osaks, saame:

$$T_s = f_{kuiv}(e)T_{kuiv}^0 + f_{marg}(e)T_{marg}^0 \quad (1.3.11)$$

kui

$$f_{kuiv}(e) \simeq f_{marg}(e) \simeq f(e) \simeq \frac{1}{\sin e}, \quad (1.3.12)$$

mis tähendab, et troposfääri viivituse kuiv komponent on täielikult kirjeldatud *a priori* mudeli poolt ja märg komponent on hinnatav parameeter, kasutades troposfääri seniidisuunalist viivitust ja kaardistamisfunktsiooni. Lisaks tuleb andmetöötluse käigus lasta hinnata ka troposfääri horisontaalsuunalisi gradiente.

A priori mudel vajab mõningaid sisendparameetreid (rõhk, temperatuur ja niiskus). Need väärtused pärinevad tavaliselt standardmudeli atmosfäärist või VMF1 puhul numbrilisest ilnamudelist. Tavaliselt on igale *a priori* troposfääri mudelile määratud ka kindel kaardistamisfunktsioon. Antud töös on kasutatud troposfääri mudelit ja kaardistamisfunktsiooni VMF1GRID. Lisaks *a priori* mudelile on töös arvutatud ka jaamade asukoha- ja mõõtmisaja põhised korrektsioonid *a priori* mudelile (valemi 1.3.10 komponent ${}^hT_k^0(t)$). Seda on tehtud GIPSY alaprogrammiga „*tropnominal*“.

1.3.5. Antenni faasitsentri korrektsioon

GPS antenn on GPS satelliitide ja GPS vastuvõtja vaheline ühenduselement, mis võtab vastu sissetuleva satelliitsignaali ja teisendab selle energia elektrivooluks. Antenni faasitsentri (ingl *Antenna Phase Centre*, APC) asukoht ei ole enamasti antenni geomeetrilises keskmes, selle asukoht sõltub raadiosignaali suunast ja kaldenurgast. Faasitsenter on veel mõjutatud

ka signaali sagedusest. Täpse positsioneerimise seisukohalt on probleemseks antenni faasitsentri nihked ja faasitsentri variatsioonid ajas. Antenni faasitsenter ja selle variatsioonid mõjutavad koordinaatidest kõige rohkem kõrgust. (EL-Hattab, 2013; Subirana, et al., 2013)

Relatiivne GPS mõõtmine kandelaine faasi kaudu mõõdab vektorit kahe antenni faasitsentri vahel, kusjuures antennid on baasjoone mõlemasse otsa paigutatud geomeetriliste keskpunktide (antenni referentspunkt (ARP)) põhjal. Selleks, et siduda see vektor geomeetriliste keskpunktidega, peab iga antenni faasitsenter nende punktide suhtes olema teada. Konstantne vektor APC ja ARP vahel on faasitsentri nihe (PCO). Peamine PCO komponent on vertikaalne aga väikesed nihked on ka horisontaalsuunas. L1 ja L2 sageduste jaoks on APC asukohad erinevad. Antenni faasitsentri variatsioon (PCV) on APC kõrvalekalle PCO-st. PCV on signaali asimuudist ja kaldenurgast sõltuv. Mõõtmiste korrigeerimine PCV tõttu on oluline rakenduste jaoks, mis vajavad kõrgeimat täpsust. PCV määrab faasi mustri iga kandelaine sageduse jaoks. Asukohamääramisel on vaja teada nii edastatava (st satelliidi) kui ka vastuvõtja antenni APC täpset asukohta ja PCV-s, et saavutada kõrgeim täpsus.

Iga faasimõõtmise APC korrigeerimine koosneb PCO ja PCV komponentidest (Hofmann-Wellenhof, et al., 2008). Antenni faasitsentri parandid sõltuvad konkreetsest satelliidist ja antenni mudelist. IGS toodete hulgas on absoluutse kalibreerimise põhjal (nõutakse alates referentsraamistikust IGS05, varem kasutati ka relatiivset kalibreerimist) määratud antenni faasitsentri korrigeerimised vastuvõtjatele ja satelliitidele (Subirana, et al., 2013a).

Absoluutsed kalibreerimised teostatakse robotiga väljas või spetsiaalses kajavabas kambris. Absoluutse kalibreerimisprotseduuri peamine idee on simuleerida erinevaid signaali suundi antenni pööramisel. Kalibreerimisseadistus koosneb fikseeritud saatjast ja katseseadmest. Igal valitud antenniasendil genereerib võrguanalüsaator (*network analyzer*) signaali, mis edastatakse GNSS antenni suunas. Protseduuri käigus mõõdetakse väljuvate ja sissetulevate signaalide vahelisi faasinihkeid. Robotiga väljas kalibreerimisi tehakse nt ettevõttes *Geo++*. Robotiga väljas kalibreerimise eeliseks on vastuvõtja ja antenni tavakeskkond (reaalsed GNSS signaalid). Laboris kalibreerimisi tehakse nt Bonni Ülikoolis (*University of Bonn*). Laboriprotseduuri peamiseks puuduseks on testisignaali erinevus reaalsest GNSS signaalist. (EL-Hattab, 2013)

IGS antenni kalibreerimise andmed on *Antenna Exchange Format* (ANTEX) formaadis ning sisaldavad põhja-, ida- ja vertikaalsuunalist konstantset nihet ARP suhtes ja faasitsentri variatsiooni funktsiooni PCV. Lisaks ANTEX formaadile on võimalik kasutada *Solution Independent Exchange format* (SINEX) formaati, mis sisaldab jaamade asukoha ja kiiruse lahendusi. Antud töös kasutatakse faasitsentri modelleerimiseks IGS antennide absoluutse kalibreerimise faili igs08.atx.

1.3.6. Tahke Maa ja pooluse loodete korrektsioon

Maakoor ei ole jäik keha ning see reageerib elastselt teiste taevakehade, peamiselt Päikese ja Kuu, poolt põhjustatud välistele gravitatsioonijõududele, mida nimetatakse loodeteks (Jet Propulsion Laboratory, 2014a). Looded tekitavad Maale perioodilisi horisontaal- ja vertikaalsuunalisi deformatsioone. Neid deformatsioone saab väljendada sfääriliste harmoonikute abil, mida iseloomustavad Love ning Shida numbrid (Cai, 2009).

Lisaks perioodilistele loodetele on Maa Päikese ja Kuu gravitatsiooni mõjul püsivalt deformeerunud (*permanent tide*). Tahke maa loodete deformatsioon on vertikaalsuunas suurusjärgus 0,3 m ja horisontaalsuunas suurusjärgus 5 cm. Kuigi perioodilised looded ööpäevaste keskmiste koordinaatide arvutamisel suures osas elimineeruvad, tuleb neid siiski täpselt modelleerida, sest ööpäevaste loodete amplituudide keskmine ei ole null. Samuti tuleb modelleerida loodete püsivat deformatsiooni, et saada koordinaadid ITRS (*International Earth Rotation Service Terrestrial Reference System*) konventsioonidele vastavas loodetevabas (*tidal free*) süsteemis. (Cai, 2009)

Pooluse loodete (*pole tide*) puhul on tegemist pikaajaliste loodetega. Maa reaalne pöörlemistelje asukoht on fikseeritud koordinaatidega punkti suhtes umbes 20 m küljepikkusega ruudu piires (nn Chandler'i võbin, mille periood on ~14 kuud). See toob kaasa erisuguseid maakoore elastseid deformatsioone, mis on üldjuhul alla 2,5 cm vertikaalselt ja 0,7 cm horisontaalselt. Pooluste loodeid tuleb arvesse võtta vaatluste puhul, mille aegrida on pikem kui kaks kuud. (Subirana, et al., 2011)

GIPSY-s kasutatakse tahke Maa ja pooluse loodete modelleerimiseks IERS (*International Earth Rotation Service*) standarditel põhinevaid mudeleid (parameetrid FreqDepLove, WahrK1 ja PolTid).

1.3.7. Ookeani loodete korrektsioon

Ookeani loodete tekitatud veemasside koormus põhjustab samuti maakoore deformatsioone. Ookeanide vesi liigub loodete mõjul edasi-tagasi ning sellised masside ümberjaotused põhjustavad regulaarset vee kuhjumist ookeani põhja. Pideva vee kuhjumise tulemusena deformeerub maakoore. Sellist nähtust nimetatakse ookeani loodete koormuseks (*ocean tide loading*). Seda on võimalik jälgida vaatlusjaama vertikaalsete ja horisontaalsete koordinaatide, raskusjõu, kallete ja pinge variatsioonidenä. Ookeani looded on tekitatud Kuu ja Päikese gravitatsioonilise tõmbe poolt ning kuna nende orbiitidel on rohkem kui üks perioodilisus, võib ookeani loodeid kirjeldada kui loodete summat, millest igaühel on oma periood. Enamasti kasutatakse ookeani loodete koormuse arvutamiseks 11 suurima amplituudiga perioodi. (Bos & Scherneck, 2011)

GIPSY arvutustes on samuti võimalik kaasata ookeani koormuse mudel. Mudelit on vaja arvutustesse kaasata, sest ookeani loodete koormus põhjustab maakoore deformatsioone 1-10 cm, peamiselt vertikaalsuunas, millel on tavaliselt 12 ja 14 kuulised perioodid. Mudelist interpolateeritakse 11 loodete perioodi vaatluspunkti, et tuletada teisi perioode (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, Ssa). Antud töös kasutati ookeani loodete koormuse arvestamiseks FES2014 mudelit. FES2014 on 2014.-2016. aastal välja töötatud FES-i ookeani loodete mudeli viimane versioon (FES2012 mudeli täiustatud versioon). FES2014 kasutab ära pikemad altimeetri aegridasid ja paremaid standardeid, täiustatud modelleerimis- ja andmete assimilatsioonitehnikat, täpsemat ookeani batümeetriat ja viimistletud võrgustatust. Mudelisse kaasatakse pikaajalisi altimeetria andmeid (Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, TPN-J1N ja ERS-1, ERS-2, ENVISAT) ja ranniku veemõõdujaamade andmeid. (European Space Agency, 2017; Jet Propulsion Laboratory, 2014a).

GIPSY-s kasutatakse ookeani loodete koormuse mudelit BQL formaadis. BQL formaadis antakse sõltuvalt asukohast ja ookeani loodete mudelist loodete amplituudid A_j ja faasinihe ϕ_j 11 peamise loodete sageduse (harmoonikud) f_j kohta (Tabel 8).

Tabel 8. 11 peamist loodete sagedust

Liik	Harmoonikud	Sagedus (tsükli päevas e cycle per day)
Pikaajaline	Ssa	0.0054758
	Mm	0.0362916
	Mf	0.0732022
Päevane	Q1	0.8932441
	O1	0.9295357
	P1	0.9972621
	K1	1.0027379
Poolepäevane	N2	1.8959820
	M2	1.9322736
	S2	2.0000000
	K2	2.0054758

Iga osaloode j jaoks arvutatakse koormuse efekt g_j ajal t :

$$g_j(t) = A_j \cos(a_j(t_0) + f_j \cdot (t - t_0) - \phi_j \frac{2\pi}{360}), \quad (1.3.13)$$

kus A_j ja ϕ_j on väärtused BQL failist. (Bos & Scherneck, 2018)

Ookeani loodete koormuse mudeleid on võimalik alla laadida Chalmers'i veebilehelt <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>. Kui kasutame JPL-i orbiidi ja kella tooteid peab kasutama ookeani loodete koefitsiente, mida on korrigeeritud ookeani loodete põhjustatud Maa massikeskme muutuste suhtes.

1.3.8. Satelliidi signaali kaldenurgast sõltuv kaalumine

Madalate kaldenurkade vaatlused on tavaliselt tundlikumad troposfääri refraktsiooni ja mitmeteelisuse efektide suhtes (Dach, et al., 2015). Taolised modelleerimata süstemaatilised vead mõjutavad tulemuste kvaliteeti. Signaali löikenurk, allapoole mida vaatlusandmeid arvutustes ei kasutata, on vaja arvutusteks ette öelda, vaikimisi on selleks väärtuseks GIPSY-s 7 kraadi (antud andmetöötles kasutati 10 kraadi). Signaalide mitmeteelisuse mõju vähendamiseks võib kasutada signaali kaldenurgast sõltuvat vaatluste kaalumist:

$$Andmekaal = \sqrt{\frac{\sin(kaldenurk)}{\sigma}}, \quad (1.3.14)$$

kus σ tähistab standardhälvet.

Olenevalt vastuvõtjast ja rakendusest võib kasutada ka „SIN“ kaalumist:

$$Andmekaal = \frac{\sin(kaldenurk)}{\sigma} \quad (1.3.15)$$

Kui ei kasutata signaali kaldenurgast sõltuvat kaalumist on andmete kaal signaali kaldenurgast sõltumatu ($1/\sigma$) (Jet Propulsion Laboratory, 2014b)

Antud töös kasutati valemis 1.3.14 kirjeldatud kaalumist.

1.3.9. Koordinaatide referentsraamistik

GNSS süsteemide tulekuga tekkis vajadus ühtse globaalse koordinaatsüsteemi järele. Satelliidid liiguvad ümber Maa selle massikeskme suhtes ehk geotsentriliselt. See tähendab, et ka koordinaatsüsteem peab olema geotsentriline. Kasutusel olev ruumiline ristkoordinaatide (Cartesiuse koordinaatide) süsteem ITRS (*IERS Terrestrial Reference System*, IERS on rahvusvaheline Maa pöörlemisteenistus – *International Earth Rotation Service*) on geotsentriline, paremakäeline ning on Maaga seotud täisnurkne süsteem, kus X-telg läbib Greenwichi meridiaani ja ekvaatori lõikepunkti, Y-telg on ekvaatori tasandil X-teljega risti suunaga itta ning Z-telg ühtib Maa pöörlemisteljega. ITRS koordinaatide ühikud on meetrites. (Rüdja & Sander, 2013)

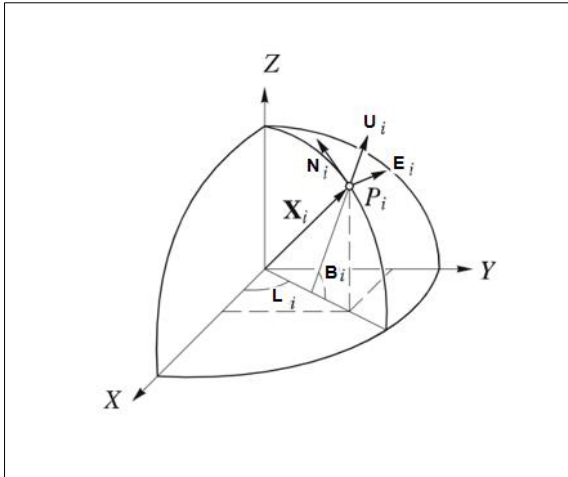
Rahvusvaheline Terrestriline Referentsraamistik (ITRF) on referentssüsteemi IERS realisatsioon. Sellel on oma koordinaattelgede alguspunkt, telgede sihid ja mõõtkava tegur, nagu ITRS-lgi. ITRF arvutatakse maapealsete statsionaarsete mõõtmisjaamade vaatlusandmete põhjal. ITRS realiseerimine tähendab praktikas erinevate kosmosegeodeetiliste vaatlussüsteemidega varustatud globaalsetele jaamadele Cartesiuse koordinaatide (X,Y,Z) ja lineaarsete kiiruste arvutamist. Tulemus avaldatakse nimetusega ITRFxxxx, kus xxxx tähendab viimast andmete kasutamise aastat, mille andmeid kasutati raamistiku moodustamisel (xx puhul aasta viimaseid numbreid). Aastate jooksul on realiseeritud 12 ITRS raamistikku (numbrid sulgudes tähistavad koordinaatide epohhi): ITRF89, ITRF90 (1988,0), ITRF91 (1988,0), ITRF92 (1988,0), ITRF93 (1988,0, 1993,0), ITRF94 (1993,0), ITRF96 (1997,0), ITRF97 (1997,0), ITRF2000 (1997,0), ITRF2005 (2000,0), ITRF2008 (2005,0) ja ITRF2014 (2010,0). Iga järgnev ITRF täiendab eelmist referentsraamistikku. (Seeber, 2003; Rüdja & Sander, 2013)

Kõige uuema referentsraamistiku ITRF2014 arvutamisel kasutati sisendina erinevate geodeetiliste mõõtmistehnikate (VLBI, SLR, GNSS ja DORIS) tehnikakeskuste (*Technique Centers*) statsionaarsete vaatlusjaamade aegridu ja Maa orientatsiooni parameetreid (*Earth Orientation Parameters*). Samu geodeetilisi mõõtmistehnikaid kasutati ka ITRF2005 ja ITRF2008 puhul. Nende mõõtmismeetoditega saadud uute ja ümbertöödeldud vanade mõõtmistulemuste põhjal eeldatakse, et ITRF2014 on ITRF2008-ga võrreldes parem ja täpsem lahendus. (International Terrestrial Reference Frame , 2016)

ITRF2005, ITRF2008 ja ITRF2014 põhiliseks erinevuseks on arvutustel kasutatud mõõtmisandmete aegridade pikkused ja erinevused andmetöötluses. Mida pikem on aegrida, seda täpsemad peaks olema ka tulemused. Antud töös kasutati referentsraamistikku ITRF2008, sest arvutuste tegemise ajal ei olnud JPL veel arvutanud tagasiulatuvalt aastasse 1997 täpseid orbiite ning kellade parameetreid.

Geodeetilised koordinaatide puhul kasutatakse abipinnana ellipsoidi. Ellipsoidi kekspunkt peab ühtima Maa massikeskmeega, ellipsoidi lühem telg Maa pöörlemisteljega ning algmeridiaan Greenwichi meridiaaniga, sellisel juhul on tegemist geodeetilise koordinaatide süsteemiga. Laiuskraad B on punkti läbiva ellipsoidi normaali ja ekvatoriaaltasandi vaheline nurk ning pikkuskraad L on Greenwichi meridiaani ja punkti meridiaani tasapinna vaheline nurk. Geodeetiline kõrgus h on vahemaa ellipsoidist punktini piki ellipsoidi normaali. (Rüdja & Sander, 2013)

Lokaalse puutetasandi koordinaadid ehk topotsentrilised koordinaadid (ingl *Local tangent plane coordinates*) kuuluvad geograafiliste koordinaatide süsteemi, mis põhinevad kohalikul vertikaalsuunal ning Maa pöörlemisteljel. Nimetatud koordinaatsüsteemi moodustavad põhja- (N), ida- (E) ja vertikaalsuunalised (U/D) teljed lähtepunkti läbiva ellipsoidi normaaliga risti oleval punkti puutetasandil (Joonis 8). Kohaliku puutetasandi koordinaate on kaks varianti ENU (ida, põhi, üles) ja NED (põhi, ida, alla). ENU koordinaadid moodustuvad maapinnaga puutuvast tasandist, mis on fikseeritud kindlas asukohas. NED koordinaate kasutatakse põhiliselt lennunduses ning seetõttu võib ka viimane koordinaat olla alla suunas, et D oleks positiivne väärtus. (Cai, et al., 2011)



Joonis 8. Globaalsed ja topotsentrilised koordinaadid. (Hofmann-Wellenhof, et al., 2008)

Andmetöötuse käigus leitud RGV I klassi punktide koordinaadid olid ruumilises ristkoordinaatide süsteemis XYZ (ITRF2008 raamistikus) ning aegridade koordinaadid on ümber arvutatud topotsentrilisse koordinaatide süsteemi ENU, kasutades seost:

$$E_i = \begin{bmatrix} -\sin L_i \\ \cos L_i \\ 0 \end{bmatrix}, N_i = \begin{bmatrix} -\sin B_i & \cos L_i \\ -\sin B_i & \sin L_i \\ \cos B_i \end{bmatrix}, U_i = \begin{bmatrix} \cos B_i & \cos L_i \\ \cos B_i & \sin L_i \\ \sin B_i \end{bmatrix} \quad (1.3.16)$$

ENU koordinaatide kasutamise eeliseks on nende lihtne lugemine ning käsitlemine punkti liikumiskiiruse arvutamise seisukohalt.

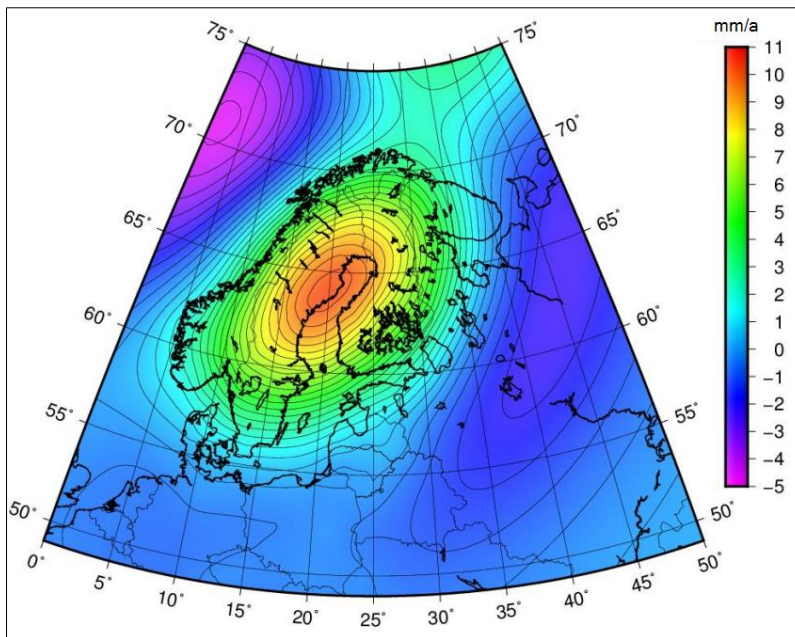
1.4. Glatsioisostaatilise tasakaalustumise mudelid

Maakoore horisontaalsed ning vertikaalsed liikumised võivad olla põhjustatud erinevatest teguritest, nagu näiteks laamtektoonika, postglatsiaalne maakoore tõus, lokaaldeformatsioonid, jne. Maa litosfäär koosneb jäikadest plaatidest ehk laamadest. Laamad on pidevas liikumises ning sellist nähtust nimetatakse laamtektoonikaks (Rüdja & Sander, 2013). Algselt arvutatakse GNSS mõõtmiste koordinaadid ITRS süsteemis (mingis ITRF raamistikus), kus koordinaatide ajalised muutused on põhjustatud peamiselt laamtektoonikast. Laamasiseste horisontaalsete deformatsioonide, nagu näiteks postglatsiaalsest maakoore tõusust põhjustatud liikumised, teadasaamiseks tuleb arvutatud kiirustest laama liikumiskiirus maha lahutada.

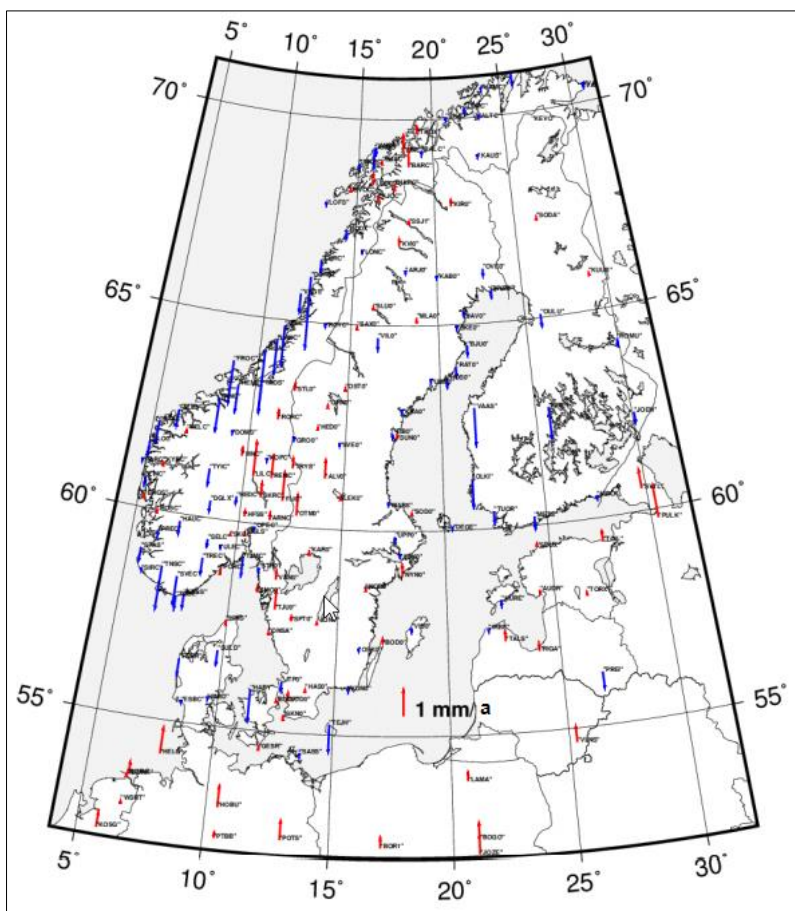
Postglatsiaalne maakoore tõus (PGR) ehk jääajajärgne maatõus on põhjustatud kunagistest jäämassidest, mis surusid maakoort alla. Kui jää sulas, hakkas ka maakoore endisesse asendisse tagasi liikuma (glatsioisostaatilise tasakaalustumise protsess ehk GIA). Eesti

kuulub Fennoskandia kerkeala piirkonda, kus laamasisesed deformatsioonid on peamiselt põhjustatud PGR-st, eriti vertikaalsuunas. PGR-st põhjustatud horisontaalsuunalised deformatsioonid moodustavad vertikaalsuunalistest umbes kolmandiku. Lokaalsete deformatsioonide põhjused võivad olla kas inimtekkelised (nt maapinna vajumine kaevandamiste, põhjavee ärapumpamine, jms tõttu) või looduslikud (ebastabiilne pinnas, nt savi, turvas, maalihked, jms). Eestis on tuntuimad lokaalse deformatsiooni piirkonnad Tallinn, Pärnu (põhjavee tarbimine) ja Ida-Virumaa (põlevkivi kaevandamine) (Rüdja & Sander, 2013).

Maakoore liikumiste kirjeldamiseks on erinevaid mudeleid. Empiiriline mudel on arvutatud otse mõõtmisandmete järgi kasutades matemaatilist meetodit (nt vähimruutude meetod). Geofüüsikaline GIA mudel põhineb Maa mudelil ja jää mudelil arvestades geofüüsikalisi põhimõtteid. Kolmanda variandina on semi-empiiriline mudel, kus kombineeritakse empiirilised andmed GIA mudeliga. NKG (*Nordic Geodetic Commission*) on välja töötanud mitmeid maakoore postglatsiaalsete liikumiste mudeleid. Antud uurimuses võrreldakse töös saadud tulemusi semi-empiirilise mudeliga NKG2016LU. Mudelil on kaks versiooni: NKG2016LU_abs (absoluutne maatõus referentsraamistikus ITRF2008) (Joonis 9) ja NKG2016LU_lev (maatõus geoidist). NKG2016LU empiiriline osa on arvutatud BIFROST (*Baseline Inferences for Fennoscandian Rebound Observations, Sea Level and Tectonics*) GNSS püsijaamade mõõtmisandmete ning Põhja- ja Baltimaade kordusnivelleerimiste põhjal. Mudeli geofüüsikaline osa koosneb GIA mudelist NKG2016GIA_prel0306, mis on arvutatud relatiivsete mereveetaseme andmete, GNSS mõõtmisandmete ja Maa reoloogilise ning jää ajaloo mudeli (GLAC) põhjal. Joonisel 10 on näha, et GIA mudeli ja GNSS andmete põhjal saadud vertikaalkiirused sobivad Eesti piires väga hästi. (Vestøl, et al., 2016)

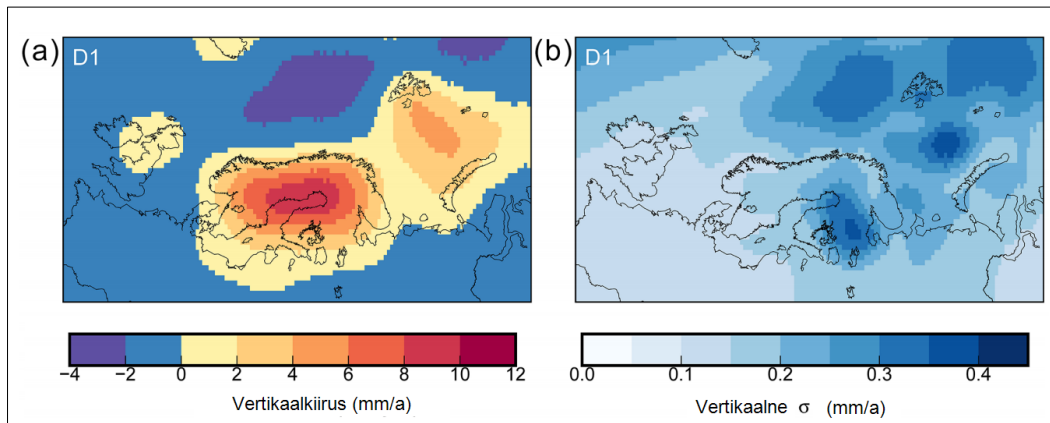


Joonis 9. Jääajajärgse maatõusu mudel NKG2016LU_abs. Isojoonte intervall 0,5 mm/a. (Vestøl, et al., 2016)



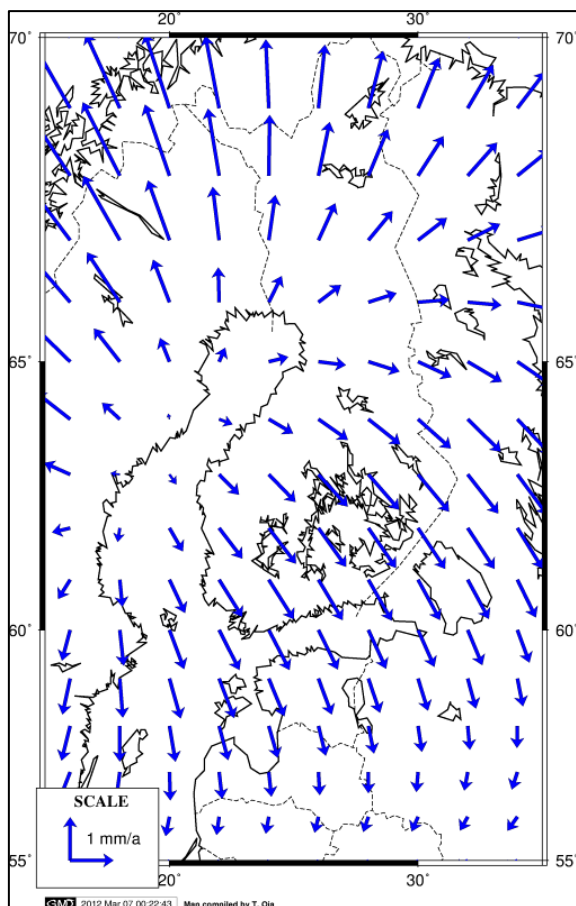
Joonis 10. Erinevus GIA mudeli NKG2016GIA_prel0306 ja GNSS püsijaamade kiiruste vahel. (Vestøl, et al., 2016)

Uurimistöö tulemusi on võrreldud ka GIA mudeliga D1 (Simon, et al., 2018) Mudel on koostatud Põhja-Euroopa, Briti saarte ja Barentsi mere piirkonna kohta. D1 esitab ainult vertikaalliikumiste kiirusi, mille väärtused on saadud *a priori* GIA mudelit, GPS vertikaalliikumise kiiruseid ja GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) satelliidi raskuskiirenduse mõõtmisi ühiselt tasandades. Joonisel 11 on näha, et D1 mudeli kohaselt jäävad vertikaalliikumised Eestis u 0-4 mm/a piiridesse.



Joonis 11. GIA-st tulenevad prognoositud vertikaalliikumised (a) ja nende määramatused (b). (Simon, et al., 2018)

NKG on loonud ka PGR põhjustatud horisontaalsuunaliste liikumiste deformatsioonimudeli NKG_RF03vel. Mudelit kasutatakse peamiselt laamasiseste deformatsioonide arvestamiseks riiklike ETRS89 realisatsioonide ja NKG ühise referentsraamistiku (NKG 2003 kampaania) vahelistel transformeerimistel (Häkli, et al., 2016). NKG_RF03vel horisontaalkiirused on näha Joonisel 12.



Joonis 12. Mudeli NKG_RF03vel horisontaalsuunalised kiirusvektorid (Lidberg, 2008) (modifitseerinud Tõnis Oja).

Lisaks NKG maatõusu mudelitele ja regionaalsetele GIA mudelitele NKG2016GIA ja D1, on arvutatud ka globaalseid GIA mudeleid (lisaks Põhja-Euroopale, Briti saartele ka Antarktika, Põhja-Ameerika, Gröönimaa), millest uuem on ICE-6G_C(VM5a) (Peltier, et al., 2015). Tegemist on geofüüsikalise GIA mudeliga, mis leiab maailmas laialdast kasutust maatõusu väärtuste määramise ja raskuskiirenduse mõõtmiste lähtepinnana (Olsson, et al., 2019). Lisaks sfääriliselt sümmeetrilisele kahekihilisele Maa mudelile ja jää mudelile kasutati koostamiseks järgmisi geoloogilisi ja geodeetilisi vaatlusi: vertikaalliikumise kiirused GPS mõõtmistest, jää paksuse muutumise andmed, relatiivse meretaseme ajalugu ning merepõhja setete vanus radiosüsinik dateeringu meetodil (Argus, et al., 2014).

Kirjeldatud mudelitest NKG2016GIA, ICE-6G_C(VM5a), NKG2016LU_abs ja D1 interpolateeritud vertikaalliikumise kiirusi kasutati antud töös RGV I klassi punktidele arvutatud kiiruste valideerimiseks. Mudelitest NKG_RF03vel, NKG2016GIA ja ICE-6G_C(VM5a) oli võimalik interpolateerida ka horisontaalkiirusi, seetõttu võrreldi ka neid antud töös arvutatud RGV I klassi punktide horisontaalkiirustega.

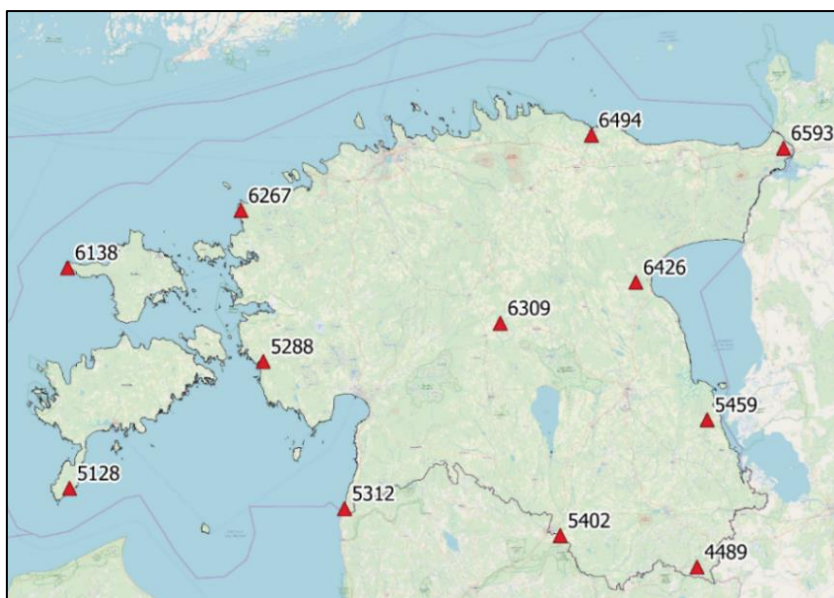
2. MATERJALID JA METOODIKA

2.1. Kasutatud andmed ja andmete eeltöötlus

Andmeanalüüsis kasutati RGV I klassi punktidel 1997., 2008. ja 2017. aastal teostatud staatiliste GNSS mõõtmiste RINEX formaadis mõõtmisandmeid, mis saadi Maa-ametist. Andmetöötles oli 12 punkti (Joonis 13), mille koordinaadid on näha Tabelis 9. Punkti 6392 ümberarvutust ei olnud vajalik teha, sest tegemist on püsijaamaga (Suurupi püsijaam) ning mille kiirused on võimalik usaldusväärsemalt arvutada püsijaamade koordinaatide pikast aegreast.

Tabel 9. Andmetöötles olnud punktid ning nende L-EST97 ristkoordinaadid (Maa-amet)

Punkti nr	Punkti nimi	X (m)	Y (m)	h (m)
4489	MISSO97	6388371,912	692332,794	216,815
5128	MÄEBE97	6426385,840	389506,505	41,782
5288	PAATSALU97	6487595,528	482992,679	25,861
5312	IKLA97	6416582,197	522213,583	25,754
5402	LONDI97	6403521,102	626320,842	99,823
5459	SUURSOO97	6459445,862	697228,377	66,801
6138	KALANA97	6532869,474	388566,599	25,749
6267	DIRHAMI97	6560464,406	472239,978	24,529
6309	KURLA97	6506085,084	597377,938	80,701
6426	PEETSU97	6525806,371	662805,299	75,178
6494	OJAKÜLA97	6596855,582	641357,569	66,201
6593	OLGINO97	6590597,187	734074,027	43,361



Joonis 13. Andmetöötles kasutatud riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide paiknemise skeem (Aluskaart: QGIS Open Street Map Standard).

Lähtudes PPP andmetöötluse spetsiifikast, kus andmeid töödeldakse üksikute punktide maksimaalselt ühe ööpäeva pikkuste mõõtmisessioonide kaupa, oli 1997. a andmete puhul vaja need eelnevalt grupeerida punktide kaupa, kuna andmed olid originaalis päevade kaupa sorteeritud. Andmefailid olid enamasti 12 tunnised, sisaldades 30-sekundilise salvestusintervalliga mõõtmisandmeid. Andmetega oli kaasas ka programmi TEQC kvaliteedikontrolli failid.

2008. ja 2017. a andmefailid olid sorteeritud punktide kaupa aga vajasisid RINEX failide kokku liitmist. Peamiseks 2017. a failide liitmise põhjuseks oli mõõtesessioonide pikkus, kuna PPP-asukohamääramise täpsus on otseselt seotud mõõtmisaja pikkusega (kõik mõõtefailid olid 1 tunni pikkused, mis liideti enamjaolt kokku 24-tunnisteks). 2008. a andmed olid 12 tunnised, sessioonid mis olid lühemad kui 12 tundi liideti kokku. 2008. a andmed olid 30-sekundilise salvestusintervalliga ning 2017. a andmed 1-sekundilise intervalliga. Andmete ühtluse mõttes tehti ka 2017. a andmed 30-sekundilisteks. Nagu mainitud, on PPP spetsiifikast lähtudes täpsete tulemuste saamiseks vajalikud pikkade mõõtesessioonide (min 4 h) andmed (Rüdja & Sander, 2013). Selleks, et saada ajaliselt pikemad sessioonid, kasutati failide liitmiseks programmi TEQC. Eelnevalt oli vaja välja selgitada, millised failid on võimalik omavahel kokku liita. Andmed sorteeriti faili nime, faili algusaja, faili lõpuaja, vastuvõtja, antenni tüübi ja antenni kõrguse järgi. Need andmefailid, mis jäid sama ööpäeva sisse, olid sama vastuvõtja, antenni ja antenni kõrgusega, liideti kokku. Eeltöötluse tulemusena saadi kolme mõõtmiskampania andmed RINEX formaadis, mis olid sorteeritud punktide kaupa, kus kõik andmefailid olid 12 kuni 24 h pikkused, 30-sekundilise salvestusintervalliga.

2.2. Andmetöötlus programmiga GIPSY-OASIS II

Programmis GIPSY rakendatakse punkti koordinaatide arvutamisel PPP-meetodit, kus peamiseks sisendiks on RINEX formaadis mõõtmisandmete fail. Programm töötab Linux-põhises operatsioonisüsteemis. Andmetöötlus toimub vastavalt soovitavale eesmärgile ning selle jaoks luuakse eraldi skript. GIPSY-s tehtud andmetöötluse põhielemendid on Tabelis 10.

Tabel 10. GIPSY andmetötluse strateegia

Mõõtmisandmed	Ainult GPS
Mõõtmised	Staatilised
Sisendfail formaat	RINEX
Asukohamääramise meetod	PPP
Referentsraamistik	ITRF2008
Algtundmatute lahendamine	Jah
Maa orientatsiooni parameetrid	IERS 2010 standardid
Orbiidi ja kellade tooted	JPL täpsed efemeriidid ja kellade parameetrid
Signaali löikenurk	10°
Salvestusintervall	30 sekundit
Antenni kalibratsioonid (satelliit ja mõõtejaam)	Fail igs08.atx
Andmete kaalumine	Signaali kaldenurgast sõltuv kaalumine
Troposfääri mudel ja kaardistamisfunktsioon	VMF1
Ionosfääri parand	Ionosfäärivaba lineaarkombinatsioon ja II-järgu parand
Ookeani loodete parand	Mudel FES2014b

Skriptifaili järgi saab programm aru, mida on vaja andmetötluses teha. Näide skriptifailist on Joonisel 14. Edaspidistes selgitustes viidatakse joonisel olevatele ridade numbritele.

```

1  #!/bin/bash
2
3  #The following environment variables were active:
4  #setenvx GOA /opt/goa-6.4
5
6  #You may need the following source command to set your PATH if you have changed it
7  #source /opt/goa-6.4/rc_gipsy.csh
8  ( gd2p.pl \
9      -i 448922630.170 \
10     -n 4489 \
11     -p 3046.876513 1567.046272 5361.953867 \
12     -env_km 0.0 0.0 0.0019083 \
13     -AntCal /media/emu/SEAGATE/RGV_GIPSY/2017/antex/4489_antex.xyz \
14     -w elmin 10 \
15     -eldepwght SORTSIN \
16     -d 2017-08-14 \
17     -r 300 \
18     -type s \
19     -e "-a 20 -PC -LC -F" \
20     -pb_min_slip 1.0e-3 \
21     -pb_min_elev 30 \
22     -amb_res 2 \
23     -dwght 1.0e-5 1.0e-3 \
24     -post_wind 5.0e-3 5.0e-5 \
25     -trop_z_rw 5.0e-8 \
26     -wetzgrad 5.0e-9 \
27     -trop_map VMF1GRID \
28     -vmfldir /media/emu/WD_BLACK/gipsy/VMF1GRID \
29     -tdp_in /media/emu/SEAGATE/RGV_GIPSY/2017/4489/tropnominal_2017/4489_VMF1.TDPdryandwet \
30     -tides WahrK1 FreqDepLove OctTid PolTid \
31     -add_ocnld "-c /media/emu/SEAGATE/RGV_GIPSY/ocnld/RGV_Ik1.BLQ -o FES2014b.gnml" \
32     -OcnldCpn \
33     -add_ocnldpoltid \
34     -ion_2nd \
35     -shell_height 600 \
36     -tec_md1 iri \
37     -orb_clk "flinnR /media/emu/WD_BLACK/gipsy/orbclk/2017" \
38     -stacov \
39     > gd2p.log ) |& sed '/^Skipping namelist/d' > gd2p.err

```

Joonis 14. Näide GIPSY-OASIS II (versioon 6.4) skriptifailist run_bash.sh, mis käivitab gd2p.pl töökäsu ning annab ette andmetötluseks vajalikud parameetrid ja arvutusteks vajalikud failide teekonnad.

Andmetöötluseks oli vajalik sisestada RINEX andmefaili nimi ja teekond selleni (rida 9), punkti nr (rida 10), punkti esialgsed (ligikaudsed) ruumilised ristkoordinaadid km-tes (rida 11), antenni ENU suunas nihe geodeetilise punkti suhtes km-tes (rida 12), vastuvõtja antenni kalibreerimise fail (rida 13), signaali löikenurk (10°) (rida 14), signaali kaldenurgast sõltuva kaalumise kasutamine (rida 15), mõõtmiste kuupäev (rida 16), lahenduse arvutamise sagedus (300 sek) (rida 17), staatilise lahenduse kasutamine (rida 18), minimaalne andmete pikkus minutites faasi- ja kaugusmõõtmiste puhul (rida 19), minimaalne tsükli nihe km-tes (*cycle slip*) (rida 20) ja minimaalne kaldenurk (rida 21), et seda järgmises lähenduses käsitleda faasi katkemisena, maksimaalne lähenduste arv alg tundmatu lähendamiseks (rida 22), faasimõõtmiste ja koodimõõtmiste kaalud kilomeetrites (rida 23), lõplik koodi- ja faasimõõtmiste aken punkti redigeerimise tsükli teostamiseks km-tes (rida 24).

Oluline oli teha kõikide mõõtmiskampaaniate arvutused ühes ja samas referentsraamistikus olenemata kampaania läbiviimise aastast. Antud töös kasutati referentsraamistikku ITRF2008. See referentsraamistik sobis, sest täpsete orbiitide ja kellaparandite väärtused selles raamistikus oli tagasi arvutatud ka esimese mõõtmiskampaania aastasse 1997. Uuemat referentsraamistikku ITRF2014 ei saanud kasutada just seetõttu, et antud töö andmetöötluse perioodil (okt-dets 2018) oli JPL jõudnud efemeriidide uude referentsraamistikku ümberarvutamiseks ainult kuni aastani 2002. Satelliitide ja vastuvõtja antenni kalibreerimiseks kasutati IGS08 ANTEX faili igs08.atx. IGS spetsiifilisest formaadist oli vaja eelnevalt moodustada GIPSY-spetsiifiline antenni kalibreerimise fail (rida 13). Selle faili tegemiseks oli vaja märkida lähtefailina kasutatud IGS08 ANTEX faili asukoht, anda uuele antenni failile nimi, märkida mõõtmistel kasutatud antenni tüüp ja punkti nimi.

Troposfääri modelleerimisel kasutati kaardistamisfunktsiooni VMF1 ja sellele vastavat *a priori* troposfääri mudelit (rida 27-28). Iga punktile loodi *a priori* mudeli korrigeerimiseks ka asukohapõhine troposfääri fail ehk nominaalne troposfääri viivituse mudel (rida 29). Nominaalsed troposfääri mudelid moodustati nii kuiva kui ka märja osa kohta, millest moodustati kombineeritud fail. Selle faili moodustamisel oli vaja märkida: punkti nimi, *a priori* troposfääri seniidiisuunalise viivituse mudel (VMF1 grid), punkti koordinaadid (laiuskraad, pikkuskraad, kõrgus ellipsoidist) ning mõõtmiste algus ja lõppaeg (J2000 aja järgi). Lisaks hinnati tundmatute parameetritena troposfääri gradiente, ehk signaali viivitust troposfääris sõltuvalt asimuudist. Troposfääri seniidiisuunalise viivituse ja märja osa viivituse gradiendi hindamiseks käsitleti nende muutust nn juhusliku ekslemisena (*random*

walk) GIPSY vaikimisi väärtusega vastavalt $5.0e-8 \text{ km}/\sqrt{\text{sek}}$ (rida 25) ning $5.0e-9 \text{ km}/\sqrt{\text{sek}}$ (rida 26).

Tahke Maa-, pooluse- ja ookeani loodete modelleerimisel lähtuti andmetöötluses IERS 2010. a standarditest (rida 30). Ookeani loodete koormuse mudelina kasutati FES2014b-d (rida 31). See kasutab mudelis olevat 11 loodete sagedust, et tuletada nendest teisi sagedusi (rida 32). Modelleeritakse ka Maa pooluse loodete põhjustatud ookeanide maakoore deformatsioone ja sellest tulenevat ookeani loodete koormuse mõju jaama koordinaatidele (rida 33).

Ionosfääri refraktsioonist tulenevate vigade eemaldamiseks kasutati lisaks kahe sageduse lineaarkombinatsioonile 2. järgu ionosfääri korrektsiooni (rida 34). Ionosfääri kihi (*shell*) keskmise kõrgusena arvestati 600 km (rida 35) ning TEC mudelina kasutati IRI2012b-d (rida 36). Satelliitide orbiidi parameetrite ja kella paranditena kasutati JPL lõplikke (*final*) tooteid (rida 37). Lahendus arvutati ainult GPS-satelliitsüsteemi kasutades.

Peale arvutusteks vajalike parameetrite sisestamist skriptifaili sai alustada mõõtmisandmete töötlemisega. Kui arvutustes tõrkeid ei esine jõutakse tulemusfailini `stacov_final.stacov`, mis sisaldab ruumiliste ristkoordinaatide väärtusi valitud referentsraamistikus ja nende täpsushinnanguid täieliku kovariatsioonimaatriksi kujul. Tõrgete ilmnemisel tuli nende põhjused logifaili abil tuvastada ja kõrvaldada. Muudatusi ei pidanud viima sisse skriptifaili `run_bash.sh` vaid `run_again` faili. Iga kord kui käivitati skriptifail, tekkis ka `run_again` fail, mis on oma sisult `run_bash.sh`, aga on mõeldud korrektsioonide sisseviimiseks. Kui tõrked on eemaldatud jõutakse tulemusfailini `stacov_final.stacov`.

PPP andmetöötlusest saadakse igale punktile algselt mitu koordinaati (igast mõõtesessiooni failist). Need koordinaadid tuleb liita antud mõõtmiskampania keskmisteks koordinaatideks kasutades kaaludena iga mõõtesessiooni kovariatsioonimaatriksit. Enne seda aga uuriti, kui palju erinevad sama punkti koordinaadid erinevatest mõõtesessioonidest. Selleks moodustati iga punkti mõõtesessioonide koordinaatidest topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegrida. Aegrea moodustamiseks kasutatakse „*stacov2enu*“ käsiklust. Tulemusena saadi *.tseries faili. Edasi hinnati aegridu visuaalselt ning eemaldati erindid (vt ptk. 2.3 ja 3.1). Erindite visuaalseks hindamiseks kasutati GNSS aegridade analüüsi tarkvara TSAlyzer. Lisaks punktide asetusele aegreas hinnati ka nende standardhälbeid ja seda, kui pikast mõõtesessioonist olid koordinaadid arvutatud.

Pärast erindite eemaldamist ühe mõõtmiskampaania aegridadest tuli sama punkti eri päevade koordinaatfailid kokku kombineerida, kasutades kovariatsioonimaatriksit ja käsku „*stamrg*“. Sama punkti erinevate koordinaatide kombineerimisel andis GIPSY kasutatud koordinaatide kokkusobivuse näitajad: CHI^2 , DOF (*Degrees of Freedom*) ja nende suhtearvu. CHI^2 arvutatakse (Jet Propulsion Laboratory, 2012):

$$CHI^2 = \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_i)^2}{\sigma_i^2}, \quad (2.2.1)$$

kus x_i on mõõdetud asukoht ja m_i on kombineeritud koordinaadi väärtus, σ_i^2 on punkti i standardhälve ruut.

DOF on vabadusastmete arv. CHI^2 ja DOF suhtearv võiks olla võimalikult 1 lähedane arv, sellisel juhul erinevatest sessioonidest arvutatud koordinaadid langevad kokku kombineeritud koordinaatidega (Jet Propulsion Laboratory, 2012).

Viimaseks sammuks on koostada aegrida sama punkti eri mõõtmiskampaaniate kombineeritud koordinaatfailidest. Tulemusena saame punkti aegrea faili läbi kolme mõõtmiskampaania topotsentrilises ristkoordinaatide süsteemis NEU, mille põhjal leitakse RGV I klassi punktide liikumiskiirused.

2.3. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide liikumiskiiruste leidmine

Punktide liikumiskiiruste arvutamisel kasutati kahte programmi: GNSS aegridade analüüsi tarkvara TSAlyzer ja MS Excel. TSAlyzer toetab *Plate Boundary Observatory* (*.pos), NASA JPL (*.tseries), CATS (*.neu) formaadis aegridasid, see tähendab et ka GIPSY aegrea väljundfaili (*.tseries). TSAlyzer üheks funktsiooniks on aegridade visualiseerimine ja interaktiivsus. TSAlyzeris on võimalik aegridadesse sisestada interaktiivselt nihkeid (antenni vahetus, jaama asukoha muutus, vms) või seismilisi sündmusi, eemaldada erindeid ja hinnata lineaarseid, polünoom- ja harmoonilisi (sesoonsuse arvestamine) signaale. Jaama liikumiskiiruste hindamine TSAlyzeris toimub vähimruutude analüüsi teel (*least squares analysis*). Lisaks on võimalik teostada spektraalanalüüsi ning visuaalset andmete kontrolli. TSAlyzer on vabavara ning kättesaadav leheküljelt <https://github.com/wudingcheng/TSAlyzer/>. (Wu, et al., 2017)

TSAalyzeris saab tuvastada aegridades esinevaid nihkeid ka poolautomaatselt. Nihete sisestamist saab teha otse või lugeda neid programmi aegridade nihete loendist. Erindite eemaldamiseks on TSAalyzeris kaks kriteeriumi: määramatuse ning keskmise standardhälbe ja kvartiilide vahe (IQR, *interquartile range*) kriteerium. (Wu, et al., 2017)

TSAalyzeris on lihtne teostada visuaalset andmete kontrolli vaadates statistikuid ning andmepunktidele lihtsasti lisatavaid standardhälvetel põhinevaid veapiire. Antud töös näitas programm hästi ära lühikesed sessioonid, millel olid tunduvalt suuremad veapiirid võrreldes pikkade mõõtmisessioonidega. Statistika aknast on näha ka ajavahemik, epohhide arv, aegrea tühikute protsent, standardhälve ning keskmine väärtus.

Aegrea analüüsi vahendina on võimalik kasutada matemaatilisi andmete sobitamise mudeleid (lineaarne, polünoomne sobitamise ja sesoonsust arvestav mudel). Antud töös kasutati lineaarset mudelit. Lineaarse trendi leidmisel kasutatakse kaalutud vähimruutude meetodit, kus kaalud leitakse koordinaatide standardhälvete põhjal. Sobitades lineaarse mudeli andmetega tekib logiaken kus on näha punkti liikumiskiirused NEU suunas ja nende standardhälbed. Lisaks kuvatakse ka WRMS (kaalutud ruutkeskmine) ja NRMS (normaliseeritud ruutkeskmine) väärtused. NRMS kujutab endast arvutatud ning tegelike andmete erinevust, mida väiksem NRMS väärtus seda parem on andmetega sobivus. Võrdluseks viidi kaalutud vähimruutude meetodil regressioonanalüüs läbi ka programmis MS Excel. Selleks kasutati *Real Statistics* (Zaiontz, n.d.) vahendite komplekti.

Lisaks kolmest epohhist koosnevale (1997,56; 2008,59; 2017,61) lineaarsele mudelile, leiti kiirused ka kahe epohhi põhjal: 1997,56 ja 2008,59; 2008,59 ja 2017,61; 1997,56 ja 2017,61, ning testiti saadud kiiruste erinevust z-testiga. Seda tehti selleks, et analüüsida, kas punktide liikumine on ajas lineaarne, nagu kolme epohhi põhjal eeldati.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide koordinaadid

Ühe GPS mõõtmiskampaania sessioonidest saadud koordinaatide kombineerimisel ei kasutatud kõiki koordinaate. Mõõtmisessioone, mida ei kasutatud lõplike koordinaatide kombineerimiseks on näha Tabelis 11. Peamiseks eemaldamise põhjuseks oli ajaliselt liiga lühike sessiooni kestvus (alla 4 h) ning kui koordinaat oli aegreas visuaalselt märgatavalt teistest koordinaatidest erinev. Kõige problemaatilisemad punktid erindite eemaldamise seisukohast olid 6138 ning 6309. Nendes punktides oli visuaalne erindite eemaldamine keerulisem. Abiks otsustamisel olid GIPSY käsuga „*stamrg*“ (edaspidi *stamrg*) koordinaatide kombineerimisel saadud sobivuse näitajad (Tabel 13, 14 ja 17).

Tabel 11. Koordinaatide kombineerimisest välistatud mõõtesessioonid

Punkti nr	Kuupäev (DD-MM-YYYY)	Eemaldatud sessiooni GPS aeg		Faili nimi	Eemaldamise põhjus
		Algus	Lõpp		
5288	08-08-2008	00:00:30	01:22:00	52882211.08O	lühike sessioon
5402	12-08-2017	00:00:00	23:59:30	540222410.17O	U suunas ca 20 mm väljas keskmisest
6138	09-08-2017	13:00:00	23:59:30	613822121.17O	N suunas keskmisest ca 10 mm väljas
6267	08-08-2008	00:00:30	03:21:00	62672211.08O	lühike sessioon
6309	20-07-1997	12:13:30	23:59:28.85	63092012.97O	U suunas ca 15 mm väljas keskmisest
6309	08-08-2008	00:00:30	01:58:30	63092211.08O	lühike sessioon
6309	14-08-2017	00:00:00	11:59:30	630922630.17O	U suunas ca 15 mm väljas keskmisest
	14-08-2017	13:00:00	23:59:30	630922631.17O	
	15-08-2017	00:00:00	11:59:30	630922640.17O	
6494	12-08-2017	10:00:00	11:59:30	649422410.17O	lühike sessioon

Koordinaatide sobivuse hindamiseks ühe mõõtmiskampaania raames on tabelites (Tabel 12, 15 ja 16) välja toodud eri sessioonidest programmi TSAlyzer väljundina saadud koordinaatide sobivused (standardhälve ja keskmine väärtus) punktide kaupa. Üheks koordinaatide headuse näitajaks on ka koordinaatide kombineerimisel GIPSY käsuga *stamrg* saadud näitajad. *Stamrg* hinnangud näitavad punktide eri mõõtesessioonidest saadud koordinaatide omavahelist sobivust vastavas punktis. Lisas 1-3 on välja toodud igast mõõtmisessioonist saadud punktide topotsentriliste koordinaatide aegread, kus igal punktil on näidatud ka veapiirid ($\pm 1\sigma$).

Tabel 12. TSAalyzerist saadud erinevatest sessioonidest arvatatud topotsentriliste koordinaatide keskmised ja standardhälbed (σ) punktide kaupa 1997. a mõõtmiskampaania kohta

Punkti nr	N (mm)		E (mm)		U (mm)	
	Keskmine	σ	Keskmine	σ	Keskmine	σ
4489	-1,70	1,63	0,90	1,36	-1,24	3,45
5128	-3,62	3,13	1,89	2,33	-2,32	5,47
5288	-2,03	4,62	0,32	2,00	-3,15	4,90
5312	-1,22	3,54	-0,54	2,44	1,24	5,03
5402	-5,24	2,55	3,40	2,24	4,21	4,59
5459	-3,74	3,26	2,38	2,24	1,54	3,59
6138	-3,59	1,98	-0,51	1,81	5,47	5,44
6267	-4,52	3,07	0,32	2,74	5,37	10,28
6309	-1,99	2,74	0,58	2,10	2,03	5,75
6426	4,50	3,55	-1,24	2,83	6,48	7,02
6494	1,72	2,09	0,25	2,92	2,79	6,97
6593	-1,85	1,74	-0,57	1,70	0,16	5,07

Tabel 13. GIPSY-s *stamrg* väljundina saadud 1997. a GPS mõõtmiskampaania eri sessioonide koordinaatide kombineerimise sobivuse hinnangud (CHI^2 ja DOF lk 47)

Punkti nr	CHI^2	DOF	CHI^2/DOF
4489	34,93	33	1,06
5128	156,90	51	3,08
5288	64,63	15	4,31
5312	117,10	33	3,55
5402	66,85	33	2,03
5459	91,53	33	2,77
6138	76,69	33	2,32
6267	136,10	33	4,12
6309	111,00	45	2,47
6426	121,60	30	4,05
6494	31,28	12	2,61
6593	64,69	33	1,96

Vaadates 1997,56 RGV I klassi punktide erinevate mõõtmisessioonide koordinaatide statistikuid (Tabel 12) näeme, et suurima väärtusega statistikud N suunas on punktidel 5288, 6426 ja 5312. Ka U suunas on nendes punktides suuremad statistikud. Standardhälve U suhtes varieerub 3,45-10,28 mm ning keskmised -3,15-6,48 mm. Problemaatilisemad punktid on 6267 ning 6426, sest nendes punktides on U suunas standardhälbed suurema väärtusega. Võrreldes N ja U suuna statistikute suurusjärku E suuna statistikutega on tulemus ühtlasem. Visuaalselt eelmainitud punkte vaadates (Lisa 1), suuri erisusi silma ei jää,

sessioonide koordinaadid on nendes punktides suuremate standardhälvetega. 1997. aasta kampaania punktide eri mõõtmisessioonidest saadud koordinaadid sobivad *stamrg* hinnangutel hästi. Sobivuse näitaja CHI^2/DOF varieerub 1,06-4,31. Parim sobivus on punktis 4489 ning kõige halvema sobivusega on punkti 5288 eri mõõtesessioonide koordinaadid.

2008. aasta koordinaatide puhul ei ole sobivused nii head, kui 1997. aasta koordinaatide puhul (Tabel 14). *Stamrg* sobivuse näitaja varieerub 2,98-9,06. Parima sobivusega koordinaadid olid punktil 6494 ning kõige halvema sobivusega punktil 6309.

Tabel 14. GIPSY-s *stamrg* väljundina saadud 2008. a GPS mõõtmiskampaania eri sessioonide koordinaatide kombineerimise sobivuse hinnangud (CHI^2 ja DOF lk 47)

Punkti nr	CHI^2	DOF	CHI^2/DOF
4489	79,60	21	3,79
5128	124,10	21	5,91
5288	110,30	33	3,34
5312	89,25	21	4,25
5402	99,04	21	4,72
5459	125,30	21	5,97
6138	137,40	36	3,82
6267	117,40	33	3,56
6309	271,80	30	9,06
6426	119,50	21	5,69
6494	107,30	36	2,98
6593	121,70	36	3,38

Tabelis 15 on näha mõõtmiskampaania keskmisel epohhil 2008,59 üksikutest sessioonidest arvutatud RGV I klassi punktide koordinaatide standardhälbed ja keskmised väärtused. Võrreldes U suuna standardhälbeid 1997,56 kampaania hälvetega näeme, et standardhälvete väärtused on ühtlasemad. Suuremad standardhälbed on punktides 6138 ja 6593. E suunas on suurim standardhälve punktis 6309. N suunas on standardhälbed suurimad punktides 6426 ja 5128. Vaadates lisas 4 olevaid nende punktide koordinaatide graafikuid, võib luua kaudse seose kahe sessiooni vahelise ajavahemikuga. Kui mõõtmisessioonide vahe on olnud rohkem kui 24h, on see mõjutanud ka statistilisi näitajaid halvemuse suunas.

Tabel 15. TSAalyzerist saadud erinevatest sessioonidest arvatud topotsentriliste koordinaatide keskmised ja standardhälbed (σ) punktide kaupa 2008. a mõõtmiskampaania kohta

Punkti nr	N (mm)		E (mm)		U (mm)	
	Keskmine	σ	Keskmine	σ	Keskmine	σ
4489	-2,83	3,43	2,04	2,00	-2,07	5,83
5128	-1,83	4,70	2,30	2,74	3,54	4,18
5288	-3,72	4,14	1,67	1,61	3,29	3,92
5312	-3,98	4,12	3,27	2,25	-0,13	3,40
5402	-3,22	3,68	3,63	2,59	0,00	5,74
5459	-3,77	4,23	3,65	2,77	-3,22	4,97
6138	-3,24	3,01	3,18	2,21	6,63	7,69
6267	-3,77	3,75	2,96	1,82	3,67	3,87
6309	0,05	3,56	5,40	4,41	7,64	5,55
6426	-4,16	4,82	2,00	2,50	-3,13	4,70
6494	-2,67	3,77	1,63	1,54	-2,98	4,83
6593	-4,56	3,28	2,65	1,77	4,78	6,83

Stamrg 2017. aasta TSAalyzeri statistikute (Tabel 16) põhjal võib öelda, et problemaatilisemad punktid olid 6494 (U suunas), 6309 (E suunas) ning 6138 (N suunas). Võrreldes teiste RGV I klassi punktidega oli nimetatud punktides standardhälbed suuremad. 2017. aasta eri mõõtmisessioonidest saadud koordinaadid sobisid punktisiseselt omavahel hästi. Punktide 6309 ja 6138 puhul oli koordinaatide sobivus halvem (Tabel 17).

Tabel 16. TSAalyzerist saadud erinevatest sessioonidest arvatud topotsentriliste koordinaatide keskmised ja standardhälbed (σ) punktide kaupa 2017. a mõõtmiskampaania kohta

Punkti nr	N (mm)		E (mm)		U (mm)	
	Keskmine	σ	Keskmine	σ	Keskmine	σ
4489	-1,20	0,87	1,20	2,62	0,78	6,29
5128	-3,14	3,68	0,81	2,98	-5,20	3,28
5288	-4,25	2,55	2,40	1,51	-2,52	2,52
5312	-4,57	2,88	0,67	1,75	-4,21	4,27
5402	-2,16	2,29	0,09	1,32	-1,95	5,48
5459	0,43	2,26	1,21	2,20	-5,00	5,03
6138	-6,08	6,05	-1,35	4,26	-4,12	5,84
6267	-3,56	2,66	2,68	1,98	-0,98	3,64
6309	-6,67	5,45	1,73	5,26	-5,44	4,01
6426	-3,23	2,49	3,40	2,28	-0,66	3,94
6494	-1,32	0,95	1,28	1,65	12,85	8,11
6593	-1,32	0,84	1,29	1,58	1,21	3,48

Tabel 17. GIPSY-s *stamrg* väljundina saadud 2017. a GPS mõõtmiskampaania eri sessioonide koordinaatide kombineerimise sobivuse hinnangud (CHI^2 ja DOF lk 47)

Punkti nr	CHI^2	DOF	CHI^2/DOF
4489	63,96	18	3,55
5128	90,34	18	5,02
5288	19,89	12	1,66
5312	35,61	18	1,98
5402	72,22	33	2,19
5459	59,49	21	2,83
6138	188,90	18	10,49
6267	38,49	15	2,57
6309	478,10	36	13,28
6426	44,31	21	2,11
6494	20,82	12	1,73
6593	21,86	18	1,21

Võrreldes kolme mõõtmiskampaania koordinaatide kombineerimise tulemusi omavahel, võib öelda, et E suunas on koordinaatide hajuvus kõige väiksem. N ja U suunas on hajuvus suurem. TSAalyzerist saadud statistikute põhjal võib öelda, et probleemsemad punktid läbi mõõtmiskampaaniate on 6426, 6138, ja 6309. Nimetatud punktide standardhälbed ja koordinaatide kombineerimise hinnangud olid kõige suuremate väärtustega. Üldjuhul on üksikutest mõõtmisessioonidest saadud koordinaatide sobivused head ja punktid 6309 ja 6138, mille puhul oli ka erindite eemaldamine keerukam. Erinditest puhastatud üksikute mõõtmisessioonide koordinaatide kombineerimise tulemusena saadi 12 punkti geotsentrilised ristkoordinaadid ITRF2008 referentsraamistikus kolme GPS mõõtmiskampaania keskmistel epohhidel (1997,56, 2008,59 ja 2017,61) (Lisa 5). Punktide liikumiskiiruste leidmiseks teisendati need topotsentrilisteks koordinaatideks N, E ja U suunas.

3.2. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide liikumiskiirused

Punktide liikumiskiirused läbi kolme epohhi (1997,56, 2008,59 ja 2017,61) arvutati lineaarse kaalutud vähimruutude regressiooni meetodil kahe erineva programmiga TSAalyzer ja MS Excel kasutades topotsentriliste koordinaatide aegridasid (Lisa 4). Kiiruste erinevused TSAalyzeri ja MS Exceli vahel olid tühised, jäädes -0,0000005 ja 0,0000005 mm/a vahele. Seega saab järeldada, et TSAalyzeriga arvutatud kiirused langevad praktiliselt täiesti kokku MS Excelis arvutatud liikumiskiirustega. Selletõttu on

edaspidistes analüüsidest kasutatud ainult TSAalyzeris arvatud RGV I klassi punktide kiiruseid. TSAalyzerist kiiruste veahinnangud (RMS, WRMS ja NRMS) on lahti seletatud peatükis 2.3.

Tabelis 18 on näha arvatud RGV I klassi punktide kiirused (mm/a) kolmes suunas (E, N, U), nende standardhälbed, kaalutud ruutkeskmised (WRMS) ja normaliseeritud ruutkeskmised (NRMS) vead. E suunas jäävad kiirused vahemikku 19,45-20,63 mm/a, N suunas 12,46-13,67 mm/a ning vertikaalsuunas 0,46-3,23 mm/a. Horisontaalkiirused N ja E sisaldavad ka Euraasia laama liikumisest põhjustatud kiiruseid. Suurimate veahinnangutega E suunas on punktide 5128, 5402 ja 5459 kiirused ning väikseimate veahinnangutega punktide 6267, 5288 ja 4489 kiirused. Vaadates N kiiruseid on suurimate veahinnangutega punktid 6494, 5128 ja 5288 ning väikseimate vigadega punktide 5312, 5459 ja 5402 liikumiskiirused. Horisontaalkiiruste puhul saab järeldada, et statistiliste näitajate järgi on kõige kehvem tulemus punkti 5128 puhul. Vertikaalkiiruste veahinnanguid vaadates on suurima täpsusega punktide 5312, 4489 ja 6267 ning väiksema täpsusega 5459, 6138 ja 5288 kiirused. Hinnates horisontaal- ning vertikaalkiiruste veahinnanguid koos on kõige täpsemad kiirused punktidel 5312 ja 4489. Punktide 5459 ja 5288 puhul on vertikaal- ja horisontaalkiiruste veahinnangud suurimad.

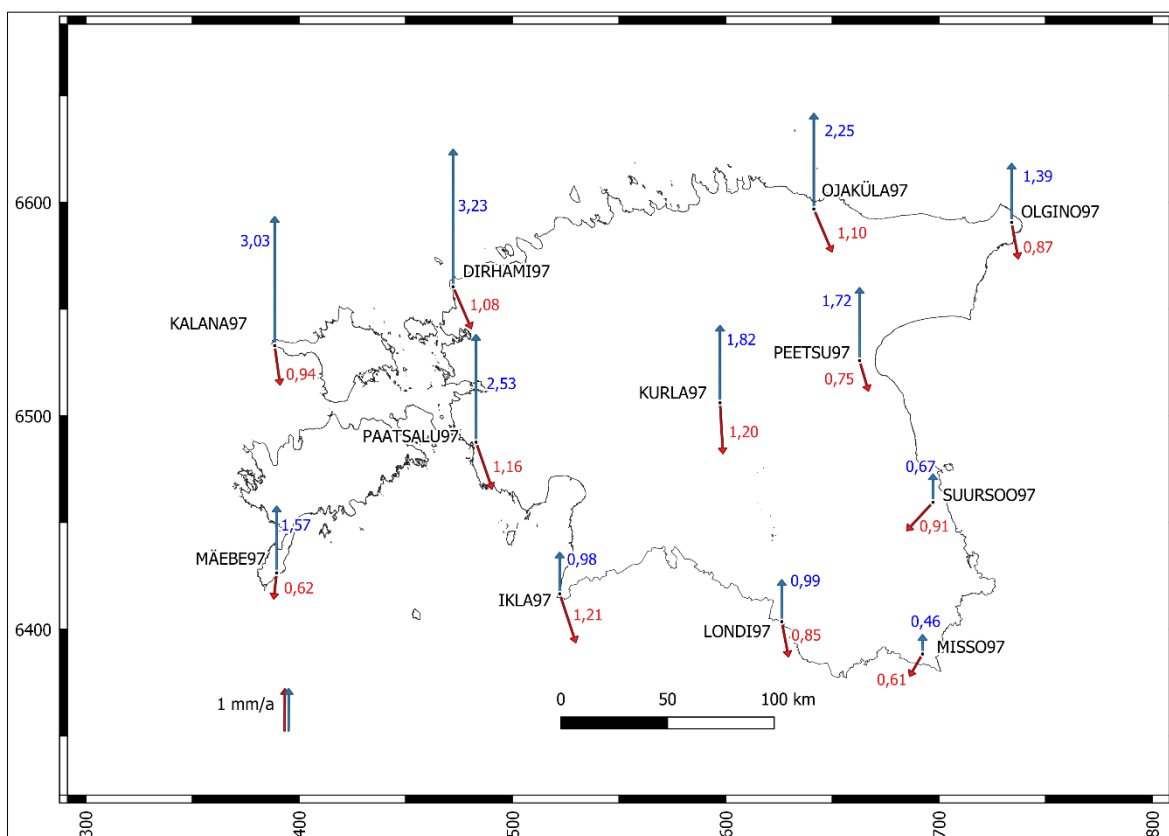
GIA-st ja lokaalsetest liikumistest põhjustatud horisontaalsuunalised (E, N) jääkkiirused on näha Tabelis 19. Nende väärtuste saamiseks lahutati Tabelis 19 N ja E suuna kiirustest veebikalkulaatorist *Plate Motion Calculator* (<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>) leitud Euraasia laama liikumise kiirused nendes punktides kasutades ITRF2008 kiirusmudelit. Tabelis 19 on näha, et jääkkiirused E suunas varieeruvad -0,62 kuni 0,43 mm/a ning N suunas -1,20 kuni -0,53 mm/a. RGV I klassi punktide horisontaal- ning vertikaalkiiruste vektorid on näha Joonisel 15.

Tabel 18. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kiirused (referentsraamistik ITRF2008) ja kiiruste standardhälbed (σ), kaalutud ruutkeskmised (WRMS) ja normaliseeritud ruutkeskmine (NRMS)

Punkti nr	N				E				U			
	Kiirus (mm/a)	σ	WRMS	NRMS	Kiirus (mm/a)	σ	WRMS	NRMS	Kiirus (mm/a)	σ	WRMS	NRMS
4489	12,95	0,05	0,71	1,52	20,42	0,05	0,67	2,14	0,46	0,07	0,94	0,70
5128	13,67	0,23	3,19	6,80	19,52	0,20	2,86	9,07	1,57	0,12	1,62	1,19
5288	12,95	0,23	2,74	5,24	20,15	0,04	0,53	1,52	2,53	0,62	7,38	4,83
5312	12,80	0,01	0,15	0,28	20,46	0,06	0,84	2,40	0,98	0,03	0,44	0,29
5402	12,83	0,03	0,48	1,02	20,63	0,27	3,85	12,40	0,99	0,17	2,48	1,83
5459	12,78	0,04	0,50	0,99	19,97	0,33	4,65	13,77	0,67	0,67	9,30	6,33
6138	13,37	0,08	1,08	2,42	19,45	0,13	1,70	5,63	3,03	0,62	7,94	6,07
6267	13,09	0,19	2,53	5,26	19,99	0,01	0,14	0,44	3,23	0,09	1,22	0,87
6309	12,54	0,06	0,83	1,92	20,21	0,11	1,59	5,51	1,82	0,37	5,21	4,13
6426	12,82	0,13	1,82	3,44	20,54	0,10	1,44	4,08	1,72	0,30	4,20	2,72
6494	12,59	0,43	4,86	9,06	20,52	0,11	1,21	3,35	2,25	0,25	2,76	1,75
6593	12,46	0,18	2,42	5,59	20,61	0,06	0,86	2,93	1,39	0,10	1,35	1,07

Tabel 19. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide horizontaalsuunalised (E, N) jääkkiirused referentsraamistikus ITRF2008 põhjustatuna GIA-st ja lokaalsetest efektidest

Punkti nr	N (mm/a)			E (mm/a)		
	Algne kiirus	Laama kiirus	Jääkkiirus	Algne kiirus	Laama kiirus	Jääkkiirus
4489	12,95	13,48	-0,53	20,42	20,73	-0,31
5128	13,67	14,29	-0,62	19,52	19,59	-0,07
5288	12,95	14,05	-1,10	20,15	19,77	0,38
5312	12,80	13,95	-1,15	20,46	20,08	0,38
5402	12,83	13,66	-0,83	20,63	20,47	0,16
5459	12,78	13,45	-0,67	19,97	20,59	-0,62
6138	13,37	14,3	-0,93	19,45	19,32	0,13
6267	13,09	14,08	-0,99	19,99	19,56	0,43
6309	12,54	13,74	-1,20	20,21	20,14	0,07
6426	12,82	13,54	-0,72	20,54	20,33	0,21
6494	12,59	13,60	-1,01	20,52	20,09	0,43
6593	12,46	13,32	-0,86	20,61	20,45	0,16

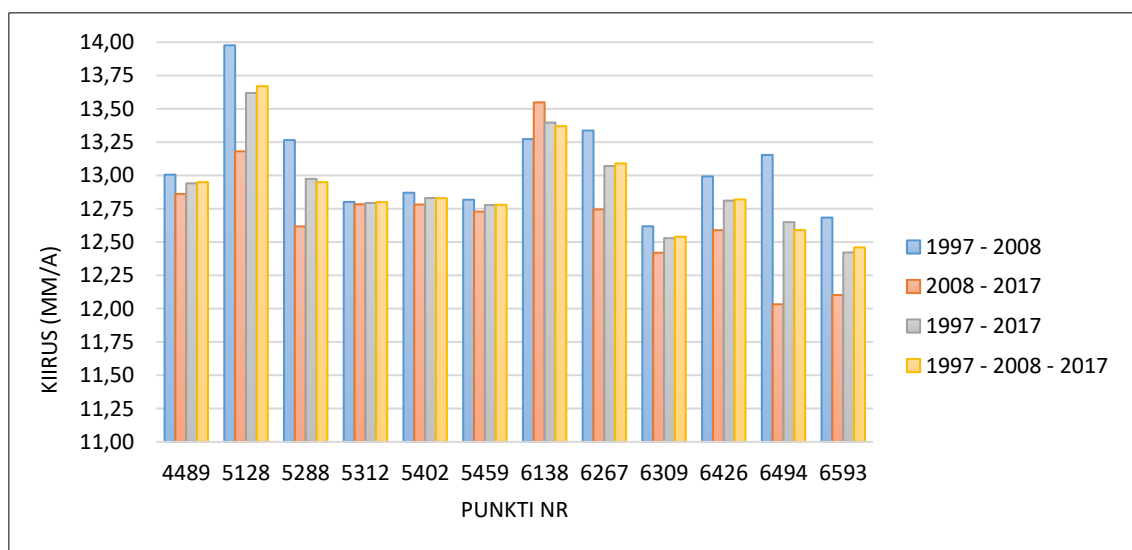


Joonis 15. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide horisontaal (punane värv)- ning vertikaalliikumiste (sinine värv) kiirusvektorid (mm/a). Laamade liikumise mõju on horisontaalkiirustest maha arvestatud. Koordinaatsüsteem L-EST97, koordinaatraamistiku väärtused on km-tes.

Vertikaalkiirused RGV I klassi punktidel varieeruvad 0,46 (Misso) kuni 3,23 (Dirhami) mm/a. Horisontaalkiirused varieeruvad 0,61 (Misso) kuni 1,20 (Kurla) mm/a. Kõigi 12 RGV punkti koordinaatide aegread (1997-2008-2017) on esitatud Lisas 4.

Lisaks kolme epohhi põhjal leitud liikumiskiirustele, teostati liikumiskiiruste lineaarsuse kontroll, et teada saada kas punktide kiirus on ajas muutunud. Selleks arvutati liikumiskiirused kolmes kombinatsioonis (1997-2008; 2008-2017; 1997-2017) ja võrreldi neid omavahel (Joonised 16-18). Kahe epohhi vahelise liikumiskiiruse saab lihtsast seosest, kus N, E või U koordinaatide vahe jagatakse neid eristava ajavahega (vastavalt 11,03, 9,02 või 20,05 aastat).

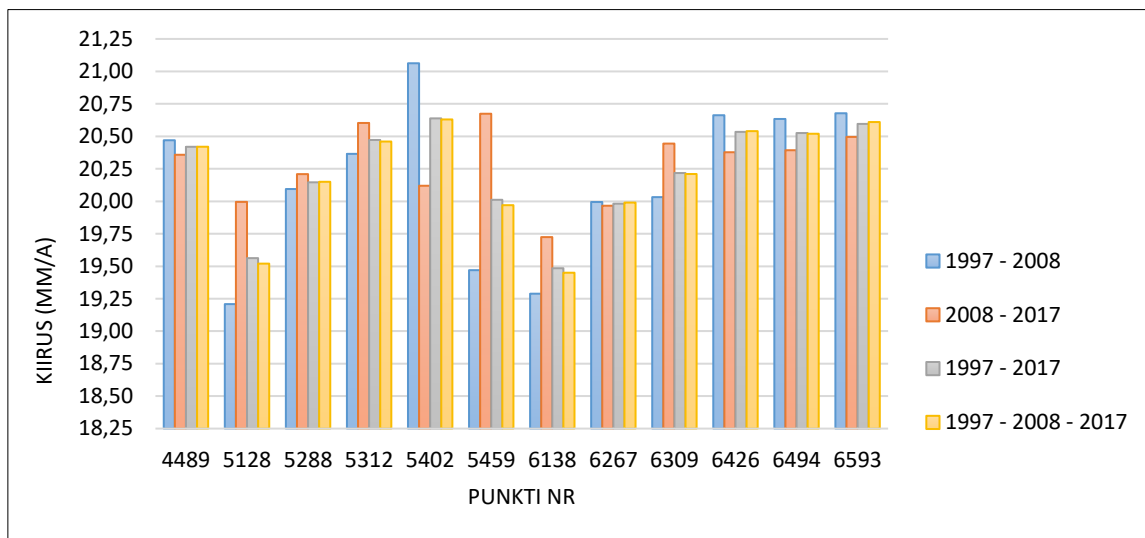
N suunas varieeruvad kiirused ca 12,6–14,0 mm/a. Enamjaolt on 2008-2017 kiirused väiksemad kui 1997-2008 puhul (va punkt 6138). 1997-2017 ja 1997-2008-2017 on omavahel väga sarnaste kiirustega. Juba Mäkinen ja Saaranen (1998) näitasid, et läbi kolme punkti tõmmatud regressioonsirge tõus ei muutu oluliselt, kui sellest keskmine punkt välja jätta. Kiiruste mittelineaarsuse poolest jäävad enim silma punktid 5128 ja 6494. Kui võrrelda nendes punktides 1997-2008 kiirusi 1997-2008-2017 kiirustega jäävad erinevused vahemikku 0,3–0,5 mm/a.



Joonis 16. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide N suunaliste kiiruste muutumine ajas.

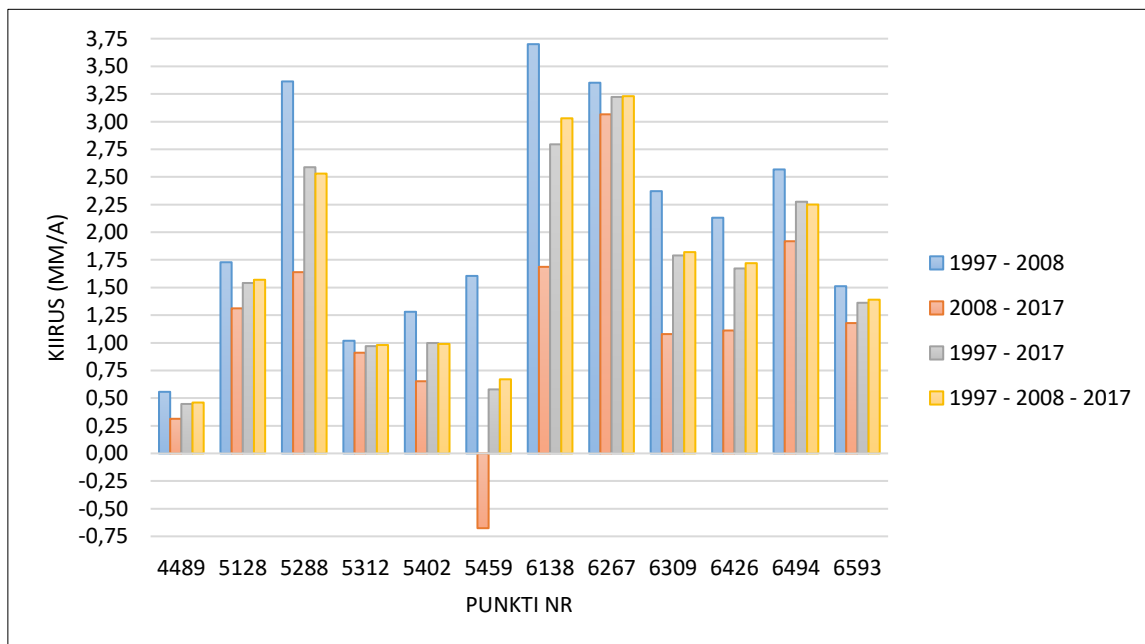
Kiirused E-suunas varieeruvad ca 19,2–21,1 mm/a. E-suunas süstemaatilisi erinevusi 1997-2008 ja 2008-2017 kiiruste vahel ei esine. Kõige paremini sobituvad kiirused omavahel punktides 5288 ja 6267. Suuremad erinevused on punktides 5128, 5402 ning 5459, kus

erinevuse suurusjärg lõpptulemusega (1997-2008-2017) ning kiiruste 1997-2008 ja 2008-2017 vahel jääb 0,3–0,5 mm/a vahele.



Joonis 17. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide E suunaliste kiiruste muutumine ajas.

E ja N koordinaatide puhul märkimisväärsed erinevusi eri kombinatsioonidest arvatud kiiruste vahel ei esinenud. Kõige väiksem on U kiiruste sobivus lineaarse mudeliga punktides 5288, 5459, 6138 ja 6309 (Joonis 18).



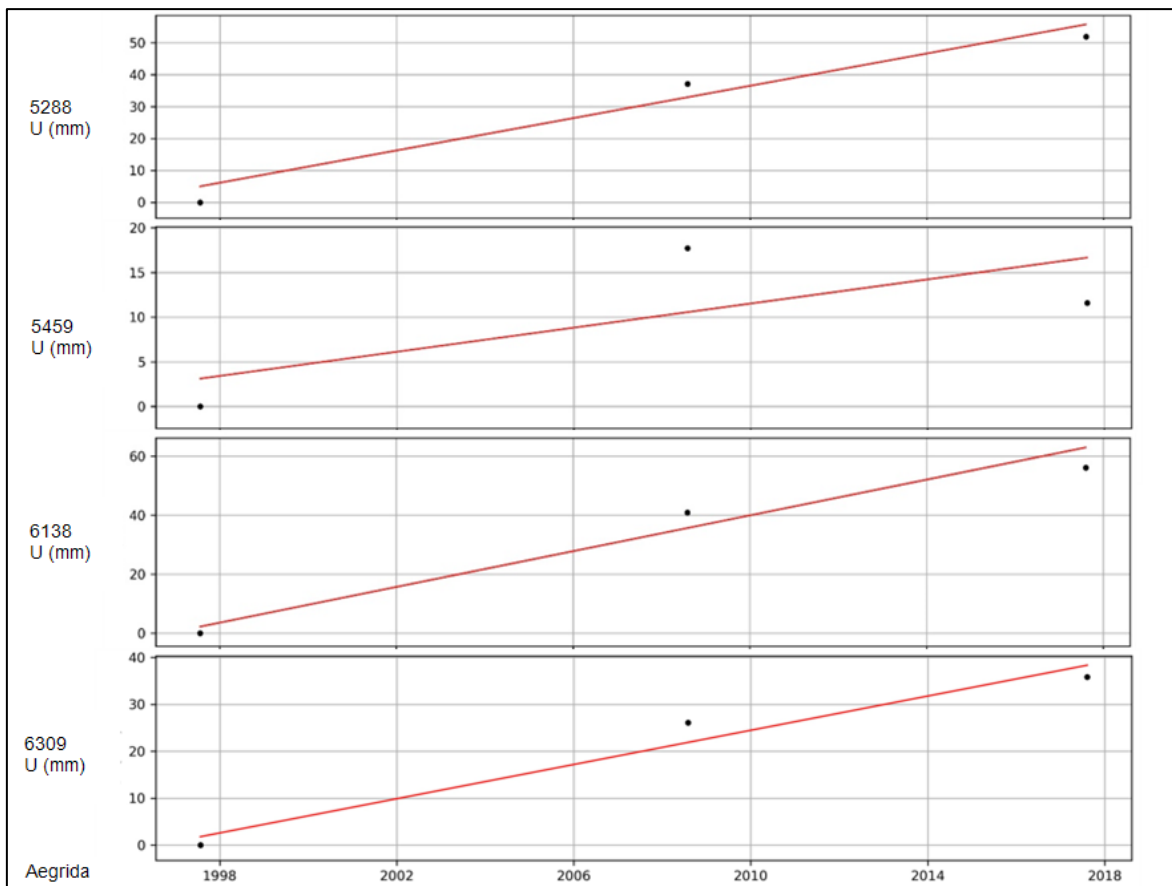
Joonis 18. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide vertikaalkiiruste muutumine ajas.

Liikumiskiiruste erinevuste olulisust kontrolliti MS Excelis z-testiga. Nullhüpotees oli, et 1997-2008 ja 2008-2017 kiiruste erinevus on null. Z-testi tegemiseks on vajalik teada ka kiiruste dispersioone. Kiiruse dispersioon (σ_v^2) arvutati valemi 3.2.1 kohaselt (Holdahl, 1978):

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma_{a_1}^2 + \sigma_{a_2}^2}{\Delta t^2}, \quad (3.2.1)$$

kus σ tähistab N, E või U koordinaadi standardhälvet, a tähistab aastat ja 1 ja 2 vastavalt aasta paare 1997 ja 2008 või 2008 ja 2017 ning Δt aastate a_1 ja a_2 ajavahet (vastavalt 11,03 või 9,02 aastat).

Olulisuse nivooks α võeti 0,05 ning kontrollima pidi p väärtust. Kui $p > 0,05$ jäädi nullhüpoteesi juurde. Tulemusena selgus, et enamasti on kiirused ajas muutunud (Tabel 20). N suunas kiiruste puhul jäädi püstitatud nullhüpoteesi juurde punktide 4489, 5312, 5402 ja 5459 puhul, E suunas 4489, 5288 ja 6267 puhul ning U suunas 4489, 5128, 5312, 6267, 6494 ja 6593 puhul. Teiste punktide kiiruste muutused on oma väärtuselt küll väga väikesed aga siiski statistiliselt olulised. Üheks põhjuseks, miks enamuse punktide puhul lükati nullhüpotees ümber, võib tuua kiiruste väga väikese formaalse täpsushinnangu, mis on põhjustatud koordinaatide väga väikesest standardhälbest (0,3-2,3 mm) ja suurest ajavahest kahe mõõtmiskampaania vahel. Tähele võib panna ka (Tabel 20), et enamasti on liikumiskiirus perioodil 2008-2017 aeglustunud võrreldes perioodi 1997-2008 kiirustega. Kiiruste muutumise põhjused vajavad eraldi väljaselgitamist. Joonisel 19 on näha lineaarsest trendist suurimate visuaalsete erinevustega punktide 5288, 5459, 6138 ja 6309 U suunaliste koordinaatide aegrida ja kaalutud lineaarsest vähimruutude meetodist kolme ajaepohhi põhjal leitud trendijoont.



Joonis 19. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 5288, 5459, 6138 ja 6309 U koordinaatide sobivus lineaarse mudeliga (punane joon).

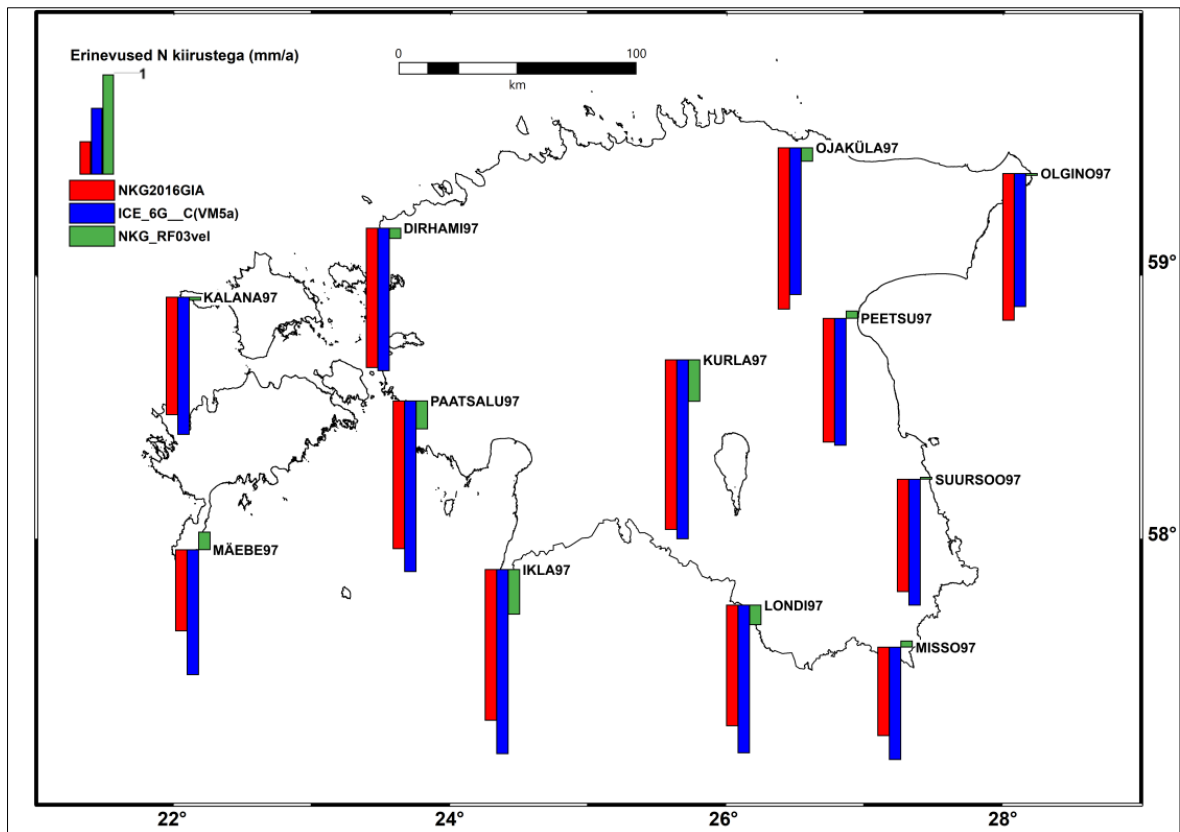
Tabel 20. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 1997-2008 ja 2008-2017 kiirused, kiiruste standardhälbed (σ) ning kiiruste erinevuse olulisus (p)

Punkti nr	N (mm/a)					E (mm/a)					U (mm/a)				
	1997-2008	σ	2008-2017	σ	p	1997-2008	σ	2008-2017	σ	p	1997-2008	σ	2008-2017	σ	p
4489	13,01	0,06	12,86	0,08	0,13	20,47	0,04	20,36	0,05	0,11	0,56	0,17	0,31	0,23	0,42
5128	13,98	0,06	13,18	0,08	0,00	19,21	0,04	20,00	0,05	0,00	1,73	0,17	1,31	0,24	0,16
5288	13,27	0,07	12,62	0,08	0,00	20,09	0,05	20,21	0,05	0,10	3,36	0,21	1,64	0,23	0,00
5312	12,80	0,06	12,78	0,08	0,87	20,37	0,04	20,60	0,06	0,00	1,02	0,18	0,91	0,25	0,72
5402	12,87	0,06	12,78	0,07	0,35	21,06	0,04	20,12	0,05	0,00	1,28	0,19	0,65	0,21	0,02
5459	12,82	0,06	12,73	0,08	0,39	19,47	0,04	20,67	0,05	0,00	1,60	0,18	-0,68	0,24	0,00
6138	13,27	0,05	13,55	0,08	0,01	19,29	0,04	19,72	0,06	0,00	3,70	0,15	1,69	0,24	0,00
6267	13,34	0,06	12,75	0,08	0,00	19,99	0,04	19,97	0,05	0,69	3,35	0,17	3,07	0,22	0,31
6309	12,62	0,05	12,42	0,07	0,03	20,03	0,04	20,44	0,05	0,00	2,37	0,16	1,08	0,20	0,00
6426	12,99	0,07	12,59	0,08	0,00	20,66	0,04	20,38	0,06	0,00	2,13	0,19	1,11	0,25	0,00
6494	13,15	0,08	12,03	0,08	0,00	20,63	0,05	20,39	0,05	0,00	2,57	0,23	1,92	0,24	0,05
6593	12,68	0,05	12,10	0,07	0,00	20,68	0,03	20,50	0,05	0,00	1,51	0,15	1,18	0,22	0,21

3.3. Tulemuste võrdlus varasemate uurimistulemustega

Uurimistöös leitud RGV I klassi punktide kiiruseid (1997-2008-2017) võrreldi erinevatest maatõusu mudelitest interpoleeritud kiirustega, selleks et hinnata tulemuste õigsust. Horisontaalkiirusi võrreldi geofüüsikaliste GIA-mudelitega NKG2016GIA (Vestøl, et al., 2016), ICE-6G_C(VM5a) (Peltier, et al., 2015) ja NKG maakoore horisontaalliikumiste mudeliga NKG_RF03vel (Lidberg, 2008). GIA-mudelitega võrdlemise puhul võib eeldada, et erinevused tulevad suuremad, kuna kiiruste referentsraamistik ei ole ühine. Mudel NKG_RF03vel on ETRF2000 referentsraamistikus. GIA-mudelitega võrdluses on kasutatud jääkkiirusi (Tabel 19), sest GIA-mudelid laamade liikumiskiirusi ei kajasta. Vertikaalkiiruseid võrreldi samuti mudelitega NKG2016GIA ning ICE-6G_C(VM5a), lisaks veel on vertikaalkiiruseid võrreldud semi-empiirilise maatõusu mudeliga NKG2016_LU_abs ja GIA mudeliga D1 (Simon, et al., 2018). Arvutatud on erinevused RGV I klassi punktide N, E ja U kiirustega (Tabel 18). Võrdluse tulemused on esitatud Tabelis 21.

Võrreldes N suunas RGV I klassi punktide kiiruseid mudeliga NKG2016GIA on kõige parem sobivus punktis 5128 (Mäebe) ja 4489 (Misso), kehvemini sobitub punkti 6309 (Kurla) kiirus (Tabel 21). Keskmiseks kiiruste erinevuseks on $-1,27 \pm 0,27$ mm/a. Vaadates statistilisi näitajaid on N suunas kiiruste sobivus mudeliga ICE-6G_C(VM5a) kehvem kui NKG2016GIA mudeliga. Erinevused ICE-6G_C(VM5a) mudeliga on suurimad punktides 5312 (Ikla) ja 6309 (Kurla), väikseim on erinevus punktis 4489 (Misso). Keskmiseks kiiruste erinevuseks on $-1,41 \pm 0,23$ mm/a. Mõlema mudeliga võrdluse puhul olid kõik kiiruste erinevused negatiivsed, mis tähendab et RGV I klassi punktide kiiruste erinevused võrreldavate nimetatud GIA-mudelitega on süstemaatilised. Selline süstemaatiline nihe on eelkõige seotud võrreldavate kiiruste erinevate referentsraamistikega. Kiiruste erinevuste standardhälve, mis peegeldab kiiruste sobivust ilma süstemaatilise nihketa jääb alla $\pm 0,3$ mm/a, mis on hea tulemus ja võrreldav kiiruste ning mudelite enda täpsusega. Väga hea sobivus on mudelist NKG_RF03vel interpoleeritud kiirustega (Tabel 21, Joonis 20), kus keskmiseks erinevuseks on $-0,11 \pm 0,19$ mm/a.

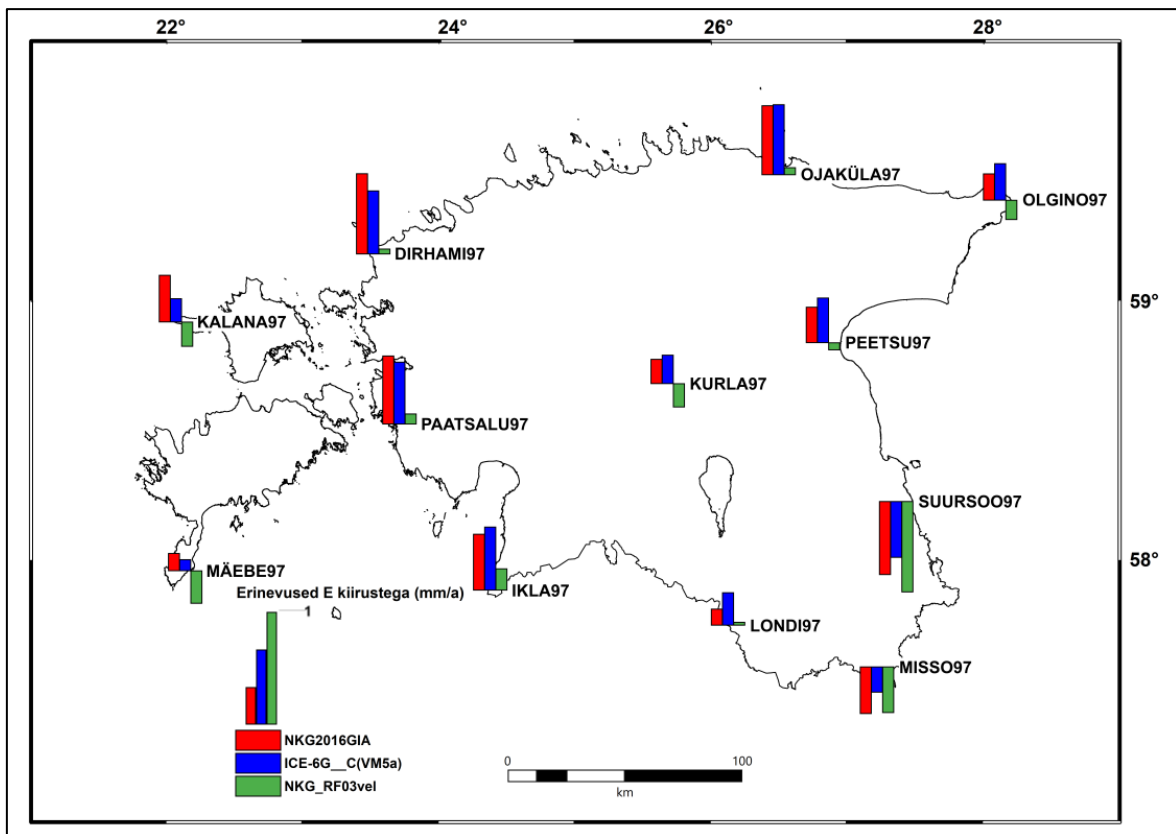


Joonis 20. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide N suunaliste kiiruste erinevus (mm/a) mudelitest NKG2016GIA, ICE-6G_C(VM5a) ja NKG_RF03vel interpoleeritud väärtustega.

Erinevused RGV I klassi punktide E suunaliste kiiruste ja mudelite NKG2016GIA ja ICE-6G_C(VM5a) vahel on väiksemad kui N suunaliste kiiruste puhul (Tabel 21, Joonis 20 ja 21). Statistiliste näitajate järgi otsustades on mõlemad mudelid sarnase sobivusega. RGV ja NKG2016GIA E suunaliste kiiruste keskmiseks erinevuseks on $0,23 \pm 0,40$ mm/a. Parim sobivus saavutati punktis 5402 ja 5128 ning kehvem sobivus punktis 6267. Võrdluses mudeliga ICE-6G_C(VM5a) oli keskmiseks kiiruste erinevuseks $0,26 \pm 0,33$ mm/a. Kõige väiksem oli erinevus punktis 5128 ning suurim punktis 6494. Mudeliga NKG_RF03vel keskmiseks erinevuseks on $-0,14 \pm 0,27$ mm/a. N kiiruste võrdlusel mudeliga NKG_RF03vel oli veidi parem sobivus. Vaadates E kiiruste keskmisi erinevusi võrreldud mudelitest on sobivus parim NKG_RF03vel mudeliga.

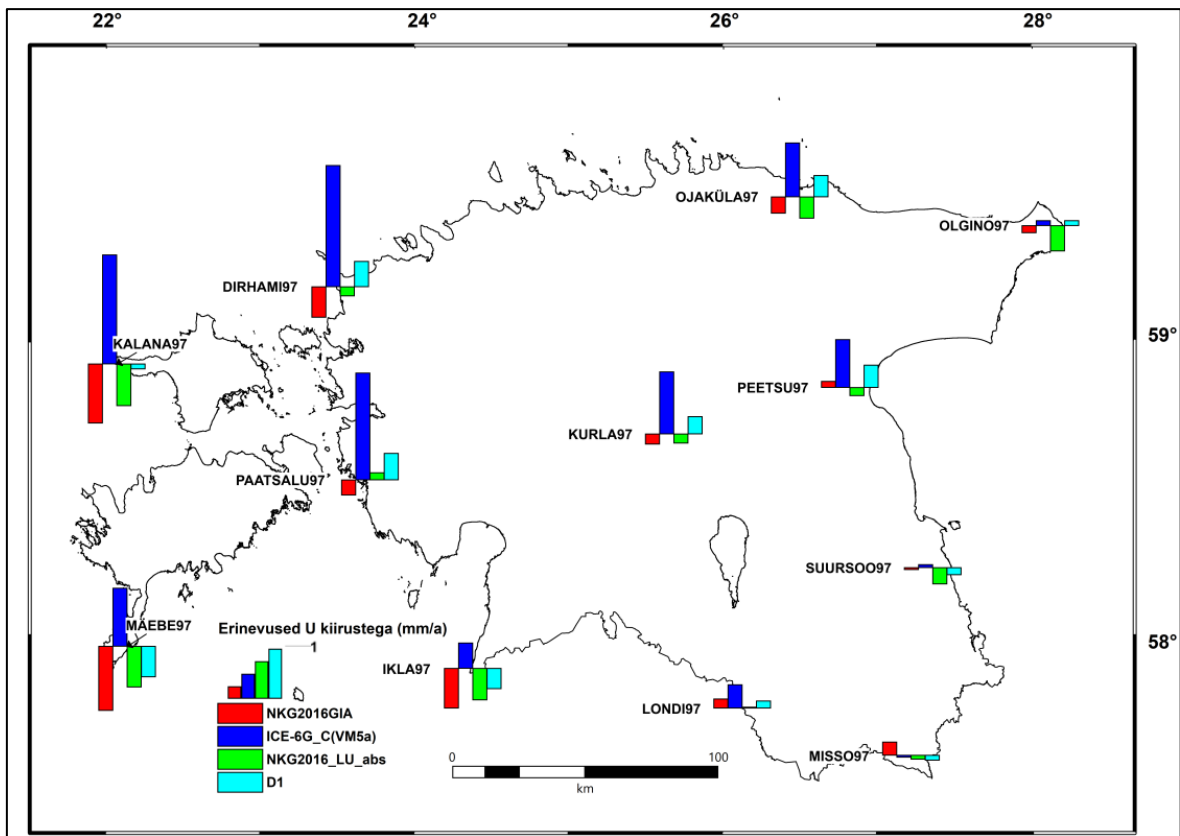
Tabel 21. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide NEU suunaliste kiiruste erinevused GIA mudelitega NKG2016GIA, ICE-6G_C(VM5a), D1, maakoore horisontaalliikumiste mudeliga NKG_RF03vel ja vertikaalliikumiste mudeliga NKG2016_LU_abs. Arvutatud kiirustest lahutati mudelitest interpoleeritud kiirused. Välja on toodud ka erinevuste keskmine, standardhälve (σ), nihketa σ ja ruutkeskmine (RMS)

Punkti nr	N (mm/a)			E (mm/a)			U (mm/a)			
	NKG2016 GIA	ICE-6G_C(VM5a)	NKG_RF03vel	NKG2016 GIA	ICE-6G_C(VM5a)	NKG_RF03vel	NKG2016 GIA	ICE-6G_C(VM5a)	NKG2016_LU_abs	D1
4489	-0,87	-1,10	0,06	-0,41	-0,22	-0,40	0,25	-0,04	-0,07	-0,10
5128	-0,80	-1,22	0,17	0,15	0,10	-0,28	-1,22	1,10	-0,77	-0,57
5288	-1,45	-1,67	-0,28	0,59	0,54	0,09	-0,29	2,01	0,13	0,50
5312	-1,48	-1,81	-0,44	0,49	0,55	0,19	-0,75	0,48	-0,60	-0,39
5402	-1,18	-1,45	-0,19	0,14	0,28	0,03	0,18	0,45	0,01	0,14
5459	-1,10	-1,23	0,02	-0,64	-0,49	-0,79	-0,03	0,06	-0,31	-0,13
6138	-1,15	-1,35	-0,03	0,41	0,20	-0,21	-1,12	2,05	-0,78	-0,09
6267	-1,37	-1,40	-0,10	0,70	0,55	0,04	-0,58	2,28	-0,17	0,49
6309	-1,66	-1,76	-0,41	0,21	0,25	-0,20	-0,19	1,18	-0,18	0,33
6426	-1,21	-1,24	0,07	0,31	0,39	-0,06	0,11	0,90	-0,16	0,43
6494	-1,58	-1,44	-0,13	0,60	0,61	0,06	-0,31	1,01	-0,41	0,40
6593	-1,44	-1,31	-0,02	0,23	0,32	-0,17	-0,13	0,09	-0,48	0,09
Keskmine	-1,27	-1,41	-0,11	0,23	0,26	-0,14	-0,34	0,96	-0,32	0,09
σ	0,27	0,23	0,19	0,40	0,33	0,27	0,48	0,80	0,30	0,36
Nihketa σ	0,26	0,22	0,18	0,38	0,32	0,26	0,46	0,77	0,29	0,34
RMS	1,30	1,43	0,21	0,45	0,41	0,29	0,57	1,23	0,43	0,35



Joonis 21. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide E suunaliste kiiruste erinevus (mm/a) mudelitest NKG2016GIA, ICE-6G_C(VM5a) ja NKG_RF03vel interpoleeritud väärtustega.

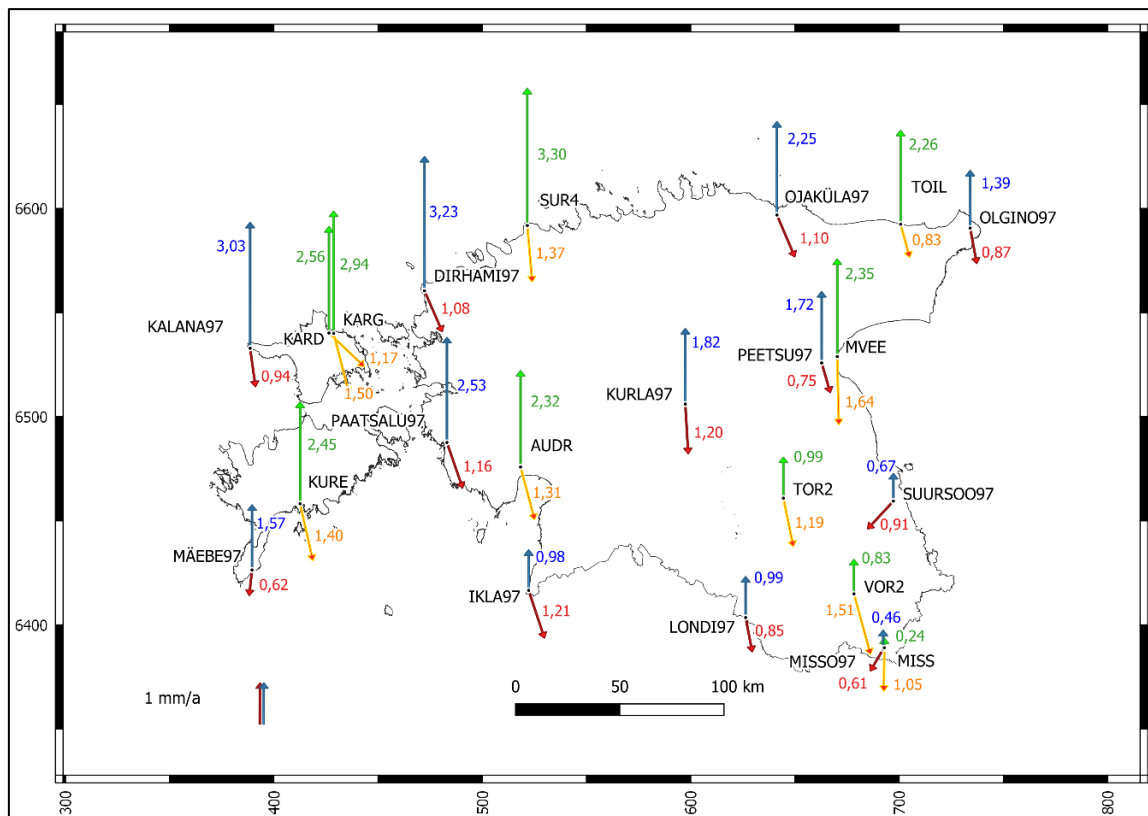
RGV I klassi punktide vertikaalkiiruseid võrreldi nelja erineva mudeliga (NKG2016GIA, ICE-6G(VM5a), NKG2016_LU_abs ja GIA D1) (Tabel 21, Joonis 22). Statistiliste näitajate järgi oli vertikaalkiiruste sobivus parim mudelitega NKG2016_LU_abs ja GIA D1. Kõige kehvem oli sobivus mudeliga ICE-6G_C(VM5a), kus keskmiseks erinevuseks on $0,96 \pm 0,80$ mm/a (Tabel 21). NKG2016GIA kiirustega võrdluse puhul keskmine erinevus on $-0,34 \pm 0,48$ mm/a, mis võrreldes NKG2016_LU_abs mudeli keskmise erinevusega ($-0,32 \pm 0,30$ mm/a) ei ole halb tulemus.



Joonis 22. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide vertikaalkiiruste erinevus (mm/a) mudelitest NKG2016GIA, ICE-6G_C(VM5a), NKG2016_LU_abs ja GIA D1 interpoleeritud väärtustega.

Keskmiselt on RGV I klassi punktide vertikaalkiiruste sobivus kõige parem GIA mudeliga D1 ($0,09 \pm 0,36$ mm/a). Horisontaalkiiruste E ja N puhul on sobivus parim NKG_RF03vel mudeliga. Keskmiseks erinevuseks E suunas on $-0,14 \pm 0,27$ mm/a ja N suunas $-0,11 \pm 0,19$ mm/a. Suuremad erinevused horisontaalkiiruste puhul on seletatavad GIA-mudelite referentsraamistike erinevusega võrreldes antud töös kasutatud ITRF2008-ga.

Tulemuste valideerimiseks võrreldi kiiruseid ka Maa-ameti (KARD, KURE; SUR4, AUDR, TOIL, MVEE, TOR2 ja VOR2) ja Trimble VRS Now (KARG ja MISS) püsijaamade vertikaal- ja horisontaalkiirusega (Kall, et al., 2019) (Joonis 23).



Joonis 23. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide horisontaal- ning vertikaalkiiruste vektorid (vastavalt punane ning sinine nool) ning GNSS püsijaamade horisontaal- ja vertikaalkiiruste vektorid (vastavast kollane ja roheline nool). Laamade liikumise mõju on horisontaalkiirustest maha arvestatud. Kiirusühik mm/a, koordinaatraamistiku väärtused km-tes.

Võrreldes omavahel RGV I klassi punktide ning Trimble VRS Now püsijaamade liikumiskiiruseid on vastuoluliseks punktiks MISSO97, kus on vertikaalliikumine RGV punktide GNSS kordusmõõtmiste põhjal suurem (0,22 mm/a) ning samuti erineb horisontaalliikumine suuruselt ja suunalt. Vertikaalkiirused KALANA97 ja KARG puhul sobituvad omavahel hästi, horisontaalkiiruse suund on samuti sarnane, aga suurusjärk erinev (0,56 mm/a). Maa-ameti GNSS püsijaamade ja RGV I klassi punktide kiiruste võrdlemisel jääb silma PEETSU97 ja MVEE suurem erinevus. Samuti on erinevus suurem MÄEBE97 ja KURE punktide puhul. Lisaks on vastuolus omavahel väga lähedal asuvad püsijaamade kiirused KARD ja KARG. Üldises pildis sobivad püsijaamade kiirused RGV I klassi punktide kiirustega hästi.

Kuna lineaarse trendi jääkide põhjal leitud kiiruste standardhälbed on liiga optimistlikud, püüti RGV I klassi punktide liikumiskiiruste keskmine määramatus leida võrreldud

modelitega sobivuse kaudu. RGV I klassi punktide liikumiskiiruste keskmine täpsushinnang enne mudelitega võrdlust on E suunas $\pm 0,12$, N suunas $\pm 0,14$ ja U suunas $\pm 0,28$ mm/a (standardhälbed lineaarse trendi jääkide hinnangust, Tabel 18). GIA mudeleid NKG2016GIA ja ICE-6G_C(VM5a) koond täpsushinnangusse ei kaasatud referentsraamistike erinevuse tõttu. Vertikaalkiiruse puhul saab kaasata NKG2016_LU_abs võrdlusel saadud sobivushinnangut. Horisontaalkiiruste puhul kaasati NKG_RF03vel võrdluse sobivushinnangut. Lõplik RGV I klassi punktide liikumiskiiruste määramatuse hinnang ($\sigma_{lõplik}$) arvutati valemi 3.3.1 kohaselt:

$$\sigma_{lõplik} = \sqrt{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_n^2}, \quad (3.3.1)$$

kus σ_1^2 on kiiruste dispersioonid lineaarse trendi jääkide põhjal (Tabel 18) ja σ_n^2 on dispersioonid kiiruste erinevusest võrreldavate mudelitega (Tabel 21).

Lõplikeks täpsushinnanguteks saadi horisontaalsuunas $\pm 0,38$ mm/a ja vertikaalsuunas $\pm 0,41$ mm/a. Täpsushinnangute põhjal võib öelda, et GIPSY-ga arvutatud RGV I klassi punktide kiirused on usaldusväärsed.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli välja selgitada maakoore postglatsiaalsed liikumised RGV I klassi punktidel teostatud GNSS kordusmõõtmiste põhjal. Selleks leiti RGV I klassi punktide 1997., 2008. ja 2017. a staatiliste GNSS mõõtmiskampaaniate põhjal punktide koordinaadid ühtses referentsraamistikus ITRF2008 ning arvutati nende põhjal punktide horisontaal- ja vertikaalliikumise kiirused. Arvutustes oli 12 RGV I klassi punkti: MISSO97 (4489), MÄEBE97 (5128), PAATSALU97 (5288), IKLA97 (5312), LONDI97 (5402), SUURSOO97 (5459), KALANA97 (6138), DIRHAMI97 (6267), KURLA97 (6309), PEETSU97 (6426), OJAKÜLA97 (6497) ja OLGINO97 (6593). RGV I klassi punktide koordinaadid on arvutatud PPP-meetodil, NASA JPL väljatöötatud tarkvaraprogrammiga GIPSY-OASIS II (versioon 6.4). Varasemalt ei ole RGV I klassi punktide koordinaatide arvutamiseks eelnevalt nimetatud programmi kasutatud. Mõõtmiskampaaniate andmed pärinesid Maa-ametilt ning sisaldasid endas RINEX formaadis mõõtefaile ning kvaliteedikontrolli faile.

Lähtudes PPP-meetodi spetsiifikast on täpsete tulemuste saamiseks vajalikud pikkade mõõtesessioonide andmed. Lühemate mõõtesessioonide kokku liitmiseks kasutati programmi TEQC, mida rakendati 2008. ja 2017. aasta andmefailidele. Kõik mõõtmiskampaania arvutused tehti ühtses referentsraamistikus ITRF2008. Uuemat referentsraamistikku (ITRF2014) ei saanud kasutatud seetõttu, et arvutamise hetkel ei olnud JPL veel efemeriidide ümberarvutamisega esimese mõõtmiskampaania aastasse 1997 jõudnud. Satelliitide ja vastuvõtja antenni faasitsentrite modelleerimiseks kasutati IGS08 ANTEX antennide kalibreerimise faili. Andmetöötluses kasutati troposfääri modelleerimist (kaardistamisfunktsioon VMF1), ionosfääri II-järgu korrektsiooni ning tahke Maa-, pooluse- ja ookeani loodete modelleerimisel lähtuti IERS 2010. a standarditest. Ookeani loodete koormuse mudelina kasutati FES2014b-d. Andmetöötluseks oli vajalik koostada lähteskript `run_bash.sh` ning väljundiks saadi fail `stacov_final.stacov`, mis sisaldas endas punkti geotsentrilisi koordinaate X, Y ja Z ja koordinaatide täielikku kovariatsioonimaatriksit. Koordinaatide põhjal leiti RGV I klassi punktide aegread topotsentrilises ristkoordinaatide süsteemis.

Ümberarvutatud RGV I klassi punktide koordinaatide põhjal arvutati programmis TSAlyzer kaalutud lineaarse vähimruutude meetodil punktide kiirused. Sama meetodit

kasutades arvutati kiirused ka MS Excelis. Võrdlustes kasutati TSAalyzeris leitud kiiruseid, sest need langesid praktiliselt täiesti kokku (erinevused $-0,0000005$ kuni $0,0000005$ mm/a) MS Excelis leitud kiirustega. Aegreaga 1997-2008-2017 sobitati lineaarne trend. Kontrollimaks, kas punktide liikumiskiirused erinevate mõõtmiskampaaniate vahel on muutunud, leiti kiirused ka kahe aasta kombinatsioonidest 1997-2008, 2008-2017, 1997-2017. Liikumiskiiruste erinevuste olulisust kontrolliti z-testiga ning enamus erinevustest olid statistiliselt olulised. Kiiruste muutuste põhjused vajavad eraldi väljaselgitamist.

Töö tulemuste valideerimiseks võrreldi neid uuematest postglatsiaalsete maakoore liikumiste mudelitest (NKG_RF03vel, NKG2016LU_abs, NKG_RF03vel, D1, NKG2016GIA, ICE-6G_C(VM5a)) interpoleeritud kiirustega. RGV I klassi punktide vertikaalkiiruste sobivus oli parim GIA mudeliga D1 ($0,09 \pm 0,36$ mm/a). Horisontaalkiiruste puhul oli sobivus parim mudeliga NKG_RF03vel ($N = -0,11 \pm 0,19$ ja $E = -0,14 \pm 0,27$ mm/a). Horisontaalkiiruste erinevused olid suuremad, võrreldes vertikaalkiirustega. Arvutatud RGV I klassi punktide kiirusi võrreldi lisaks ka ESTREF ja Trimble VRS Now GNSS püsijaamade võrgu punktide KARD, KURE, SUR4, AUDR, TOIL, MVEE, TOR2, VOR2, KARG ja MISS kiirustega. Püsijaamade ning RGV I klassi punktide kiiruste vahel esinevad mõningased erinevused, kuid üldiselt sobivad kiirused omavahel määramatuse piirides hästi.

Töö eesmärk täideti 12-le RGV I klassi punktile kiiruste arvutamisega. Võrreldes leitud kiiruseid varasemate uuringutega ja GNSS püsijaamade kiirustega on tulemused usaldusväärsed. RGV I klassi punktide kiiruste üldiseks täpsushinnanguks horisontaalsuunas saadi $\pm 0,38$ mm/a ja vertikaalsuunas $\pm 0,41$ mm/a.

Kokkuvõtteks võib öelda, et programm GIPSY võimaldab kasutada andmetöötluses erinevaid modelleerimise parameetreid ning parandeid, mis võimaldavad saavutada täpseid tulemusi. Vaadates leitud kiiruste lõplikke täpsushinnanguid võib öelda, et GIPSY-s arvutatud punktide koordinaadid ja nende põhjal leitud liikumiskiirused on usaldusväärsed. Edaspidistes uuringutes võiks samuti kasutada GIPSY tarkvara ning teha ümberarvutused kõige uuemas referentssüsteemis, milleks hetkel on ITRF2014.

KASUTATUD KIRJANDUS

Alnek, K., 2013. *Täpse positsioneerimise meetodi kvaliteet riigi geodeetilise*. Magistritöö. Tartu: Eesti Maaülikool.

Argus, D. F., Peltier, W. R., Drummond, R. & Moore, A. W., 2014. The Antarctica component of postglacial rebound model ICE-6G_C (VM5a) based on GPS positioning, exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level histories. *Geophys. J. Int.*, Köide 198, pp. 537-563.

Bingley, R. et al., 2001. *Monitoring the vertical land movement component of changes in mean sea level using GPS: Results from tide gauges in the UK*. [Võrgumaterjal] Leitav:

https://www.researchgate.net/publication/228406249_Monitoring_the_vertical_land_movement_component_of_changes_in_mean_sea_level_using_GPS_Results_from_tide_gauges_in_the_UK [20.04.2019]

Boehm, J., Heinkelmann, R. & Schuh, H., 2007. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81(10), p. 679–683.

Boehm, J. & Schuh, H., 2004. Vienna Mapping Functions in VLBI analyses. *Geophys. Res. Lett.*, 31.

Bos, M. S. & Scherneck, H.-G., 2018. *Ocean tide loading definitions*. [Võrgumaterjal] Leitav: http://holt.oso.chalmers.se/loading/BLQ_phases.html [04.05.2019]

Bos, M. S. & Scherneck, H. G., 2011. *Ocean tide loading explained*. [Võrgumaterjal] Leitav: <http://holt.oso.chalmers.se/loading/loadingprimer.html> [27.03.2019]

Böhm, J., Werl, B. & Schuh, H., 2006. Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 111.

Cai, C., 2009. *Precise Point Positioning Using Dual-Frequency*. Master Thesis. Calgary(Alberta): University of Calgary

Cai, G., Chen, B. M. & Lee, T. H., 2011. *Unmanned Rotorcraft Systems*. New York: Springer.

- Cencetti, C. et al., 2000. The evolution of Montebestia landslide (Umbria, Central Italy). Site investigations, in-situ tests and GPS monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), pp. 799-808.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P. & Fridez, P., 2015. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. s.l.:Astronomical Institute, University of Bern.
- Davis, J. et al., 1985. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length. *Radio Science*, 20(6), pp. 1593-1607.
- Duman, H. & Sanli, D. U., 2019. Assessment of geodetic velocities using GPS campaign measurements over long baseline lengths. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, p. 571–582.
- EL-Hattab, A. I., 2013. Influence of GPS antenna phase center variation on precise positioning. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Issue 2, pp. 272-277.
- Ellmann, A., 2008. *Riigi geodeetilise põhivõrgu 12 punkti GPS-kordusmõõtmise projekti juhtimine*. Tallinn: Maa-amet.
- Estey, L. H. & Meertens, C. M., 1999. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*, 3(1), p. 42–49.
- European Space Agency, 2017. *Ocean Product Handbook*. [Võrgumaterjal] Leitav: <https://earth.esa.int/documents/10174/125272/CryoSat-Baseline-C-Ocean-Product-Handbook> [27.03.2019]
- Grynshyna-Poliuga, O. et al., 2015. Comparison of TEC value from GNSS permanent station and IRI model. *Advances in Space Research*, 55, p. 1976–1980.
- Héroux, P. & Kouba, J., 2001. GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), pp. 573-578.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E., 2008. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Austria: Springer-Verlag Wien.
- Holdahl, S. H., 1978. *Models for extracting vertical crustal movements from leveling data, In Proceedings of the GEOP Conference “Applications of Geodesy to Geodynamics”*. Ohio: Ohio State University, pp. 183–190.

Hoque, M. M. & Jakowski, N., 2007. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. *Journal of Geodesy*, 81(4), pp. 259-268.

Häkli, P. et al., 2016. *NKG2008 transformation and new common reference frame*, San Sebastian, Spain: EUREF symposium.

International Terrestrial Reference Frame, 2016. *ITRF solutions*. [Võrgumaterjal]
Leitav: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/index.php [23.04.2019]

Jet Propulsion Laboratory, 2012. *Network and Post Processing*. [pdf] s.l.: NASA Jet Propulsion Laboratory.

Jet Propulsion Laboratory, 2014a. *GIPSY/OASIS Overview and Under the Hood*. [pdf] s.l.: NASA Jet Propulsion Laboratory.

Jet Propulsion Laboratory, 2014b. *Precise Point Positioning with gd2p.pl*. [pdf] s.l.: NASA Jet Propulsion Laboratory.

Jet Propulsion Laboratory, n.d. *GIPSY-OASIS*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/> [11.04.2019]

Kall, T., Oja, T., Kollo, K. & Liibus, A., 2019. The Noise Properties and Velocities from a Time-Series of Estonian Permanent GNSS Stations. *Geosciences*, 9(5), p. 233.

Kedar, S., Hajj, G. A., Wilson, B. D. & Heflin, M. B., 2003. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophysical Research Letters*, 30(16), p. 1829.

King, M., Nguyen, L. N., Coleman, R. & Morgan, P., 2000. Strategies for High Precision Processing of GPS Measurements with Application to the Amery Ice Shelf, East Antarctica. *GPS Solutions*, 4(1), pp. 2-12.

Kollo, K., 2010. *Computations of remeasurement campaign of remeasurement campaign of Estonian I-order National Geodetic Network*. Hønefoss, Norway, Departement Of Geodesy Estonian Land Board.

Kollo, K., Metsar, J. & Ellmann, A., 2017. Riigi geodeetilise võrgu I klassi kordusmõõtmised 2017. *Geodeet*, 47, pp. 19-23.

Landskron, D., 2018. [Võrgumaterjal]
Leitav: <http://vmf.geo.tuwien.ac.at/readme.txt> [12.05.2019]

Landskron, D. & Böhm, J., 2018. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), p. 349–360.

Lidberg, M., 2008. *Geodetic Reference Frames in Presence of Crustal Deformations*. Stockholm, FIG Working Week 2008 .

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. & Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dyn*, 56, p. 394–415.

Marini, J. W., 1972. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science*, 7(2), pp. 223-231.

Metsar, J., Kollo, K. & Ellmann, A., 2018. Modernization of The Estonian National GNSS Reference Station Network. *Geodesy and Cartography*, 44(2), pp. 55-62.

Milne, G. A. et al., 2001. Space-Geodetic Constraints on Glacial Isostatic Adjustment in Fennoscandia. *Science*, 291(5512), pp. 2381-2385.

Mäkinen, J. & Saaranen, V., 1998. Determination of post-glacial land uplift from the three precise levellings in Finland. *Journal of Geodesy*, 72(9), pp. 516-529.

Ocalan, T., Erdogan, B., Tunalioglu, N. & Durdag, U. M., 2016. Accuracy Investigation of PPP Method Versus Relative Positioning Using Different Satellite Ephemerides Products Near/Under Forest Environment. *Earth Sciences Research Journal*, 20(4), pp. D1-D9.

Oja, T., Kollo, K. & Priit, P., 2014. GIAst ja maapinna liikumistest Eestis GNSS täppismõõtmiste valguses. *Geodeet*, 44.

Olsson, P.-A. et al., 2019. Postglacial gravity change in Fennoscandia—three decades of repeated absolute gravity observations. *Geophys. J. Int.*, 217, p. 1141–1156.

Peltier, W. R., Argus, D. F. & Drummond, R., 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *J. Geophys. Res.*, 119, p. 450–487.

Planserk, 1997. *Geodeetiliste tööde aruanne: Riigi geodeetilise põhivõrgu GPS mõõtmised ja väliarvutused*. Tallinn: Planserk.

Planserk, 1998. *Geodeetiliste tööde aruanne: Riigi geodeetilise põhivõrgu kameraalarvutused*. Tallinn: Planserk.

Rayan, A. et al., 2010. Evaluation of the crustal deformations in the northern region of Lake Nasser (Egypt) derived from 8 years of GPS campaign observations. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4), pp. 210-215.

Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. & Grinter, T., 2012. PPP versus DGNSS. *Geomatics World*, 20(6), pp. 18-20.

Rontogianni, S., 2010. Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994–2000. *Journal of Geodynamics*, 50, p. 381–399.

Rüdja, A., 2004. *Geodetic datums, reference systems and geodetic networks in Estonia*. Helsinki: Finnish Geodetic Institute.

Rüdja, A. & Sander, J., 2013. *Globaalne asukohamääramine*. Tallinn: Innove.

Seeber, G., 2003. *Satellite Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.

Simon, K. M., Riva, R. E. M., Kleinherenbrink, M. & Frederikse, T., 2018. The glacial isostatic adjustment signal at present day in northern Europe and the British Isles estimated from geodetic observations and geophysical models. *Solid Earth*, 9, p. 777–795.

Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J. & Hernández-Pajares, M., 2011. *Pole Tide*. ESA Navipedia. [Võrgumaterjal] Leitav: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Pole_Tide [09.04.2019]

Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J. & Hernández-Pajares, M., 2012. *Mapping of Niell*. ESA Navipedia. [Võrgumaterjal] Leitav: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Mapping_of_Niell [27.03.2019]

Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J. & Hernández-Pajares, M., 2013a. *GNSS Data Processing: Volume I: Fundamentals and Algorithms*. s.l.:European Space Agency.

Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J. & Hernández-Pajares, M., 2013b. *Tropospheric Delay*. ESA Navipedia. [Vörgumaterjal]

Leitav: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Tropospheric_Delay [27.03.2019]

Zaiontz, C., n.d.. *Real Statistics Using Excel*. [Vörgumaterjal]

Leitav: <http://www.real-statistics.com/free-download/real-statistics-resource-pack/> [17.04.2019]

Wendt, J. & Dietrich, R., 2003. Determination of recent crustal deformations based on precise GPS measurements in the Vogtland earthquake area. *Journal of Geodynamics*, 35(1-2), pp. 235-246.

Vestøl, O. et al., 2016. *NKG2016LU, an improved postglacial land uplift model over the Nordic-Baltic region*, s.l.: Nordic Geodetic Commission (NKG) Working Group of Geoid and Height Systems.

Wu, D., Yan, H. & Shen, Y., 2017. TSAalyzer, a GNSS time series analysis software. *GPS Solut*, 21, p. 1389–1394.

Wu, J. C. et al., 2001. Research on an intraplate movement model by inversion of GPS data in North China. *Journal of Geodynamics*, 31(5), pp. 507-518.

Ögütcü, S. & Kalayci, I., 2015. Second-Order Ionospheres' Effect in Precise Point Positioning During the Solar Minimum and the Solar Maximum Periods in Turkey. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp. 669-674.

Yavasoglu, H., Tari, E. & Masson, F., 2010. *Slip Partition on the North Anatolian Fault and Its Splays in Central Anatolia Using GPS Data*. [Vörgumaterjal]

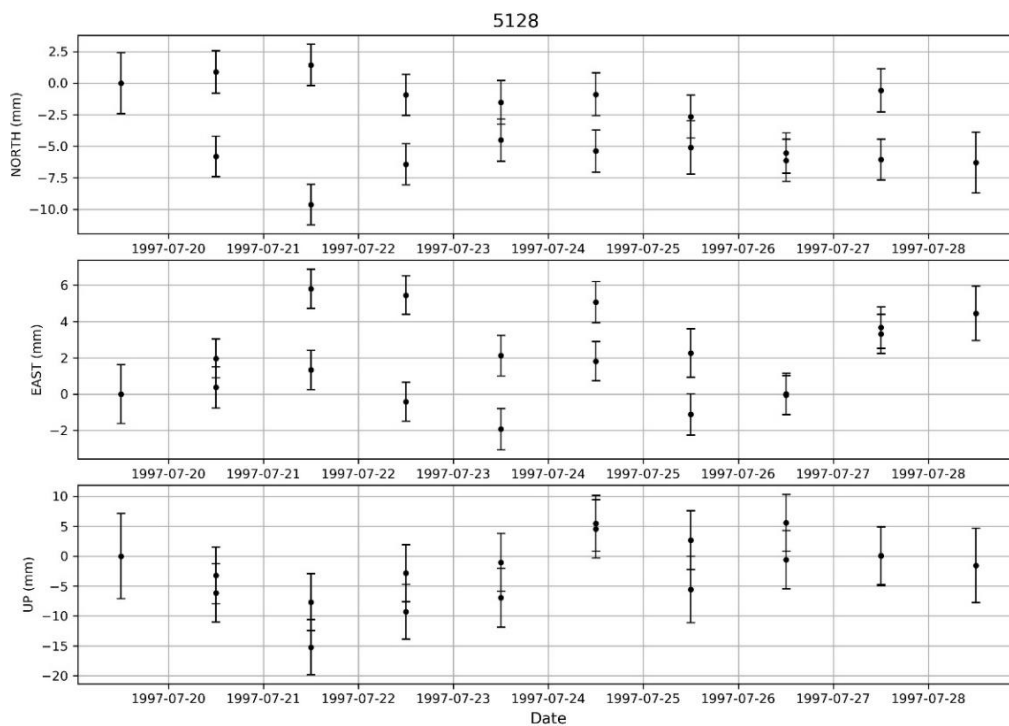
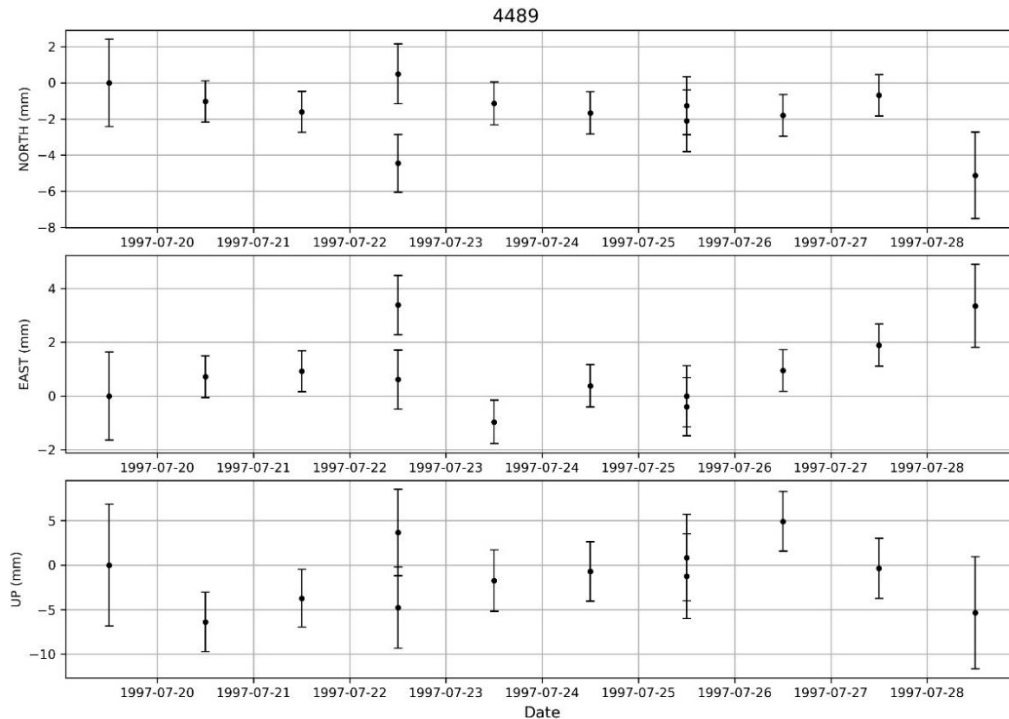
Leitav:

https://www.researchgate.net/publication/228741291_Slip_Partition_on_the_North_Anatolian_Fault_and_Its_Splays_in_Central_Anatolia_Using_GPS_Data [20.04.2019]

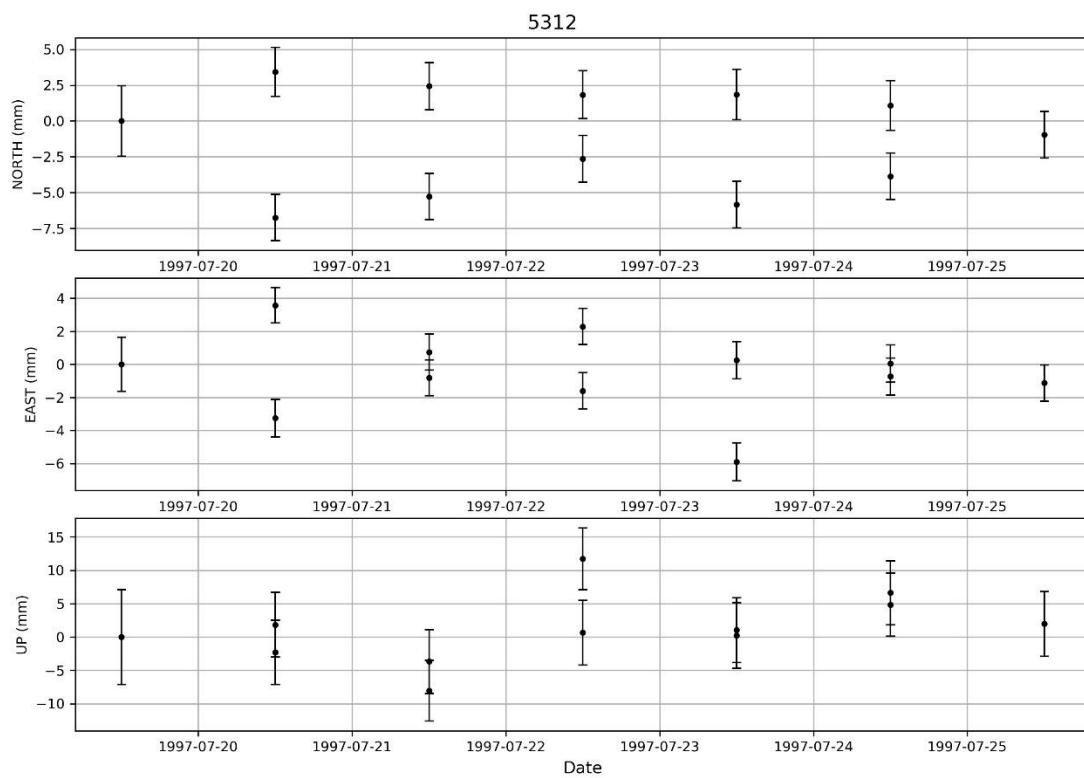
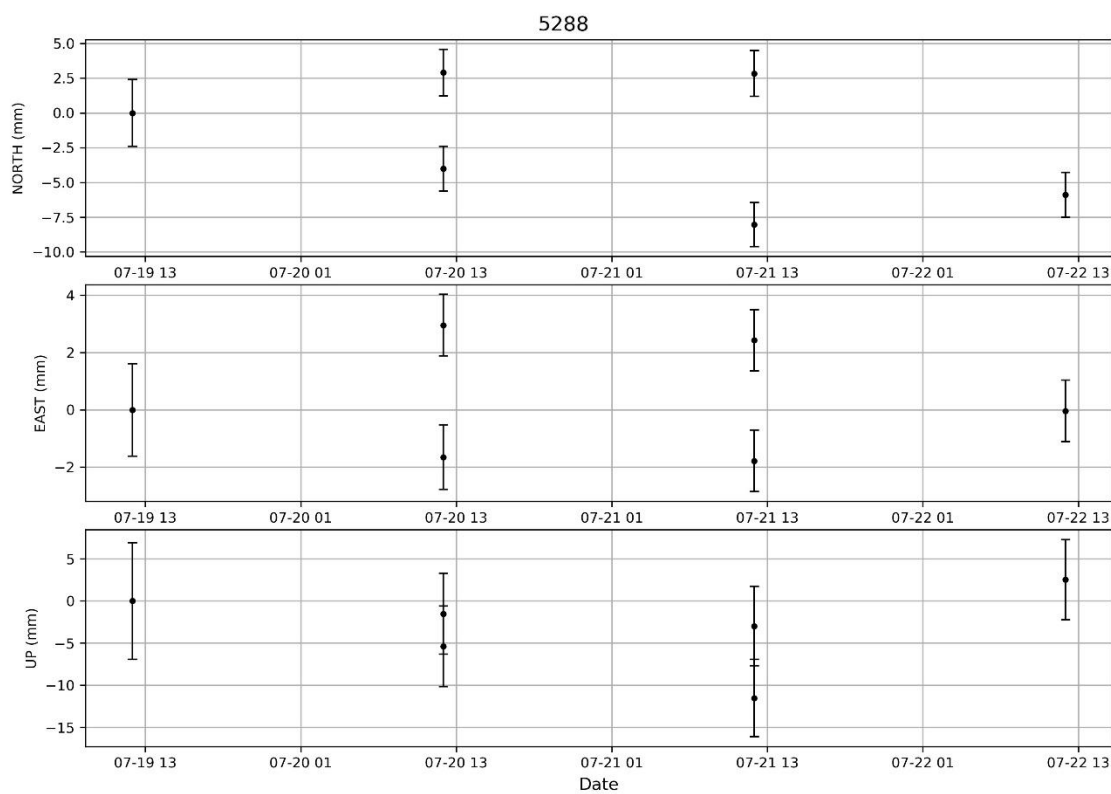
LISAD

**Lisa 1. 1997. a GPS mõõtmiskampaania erinevatest mõõtmisessioonidest arvutatud
topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegread riikliku geodeetilise võrgu I
klassi punktide kaupa**

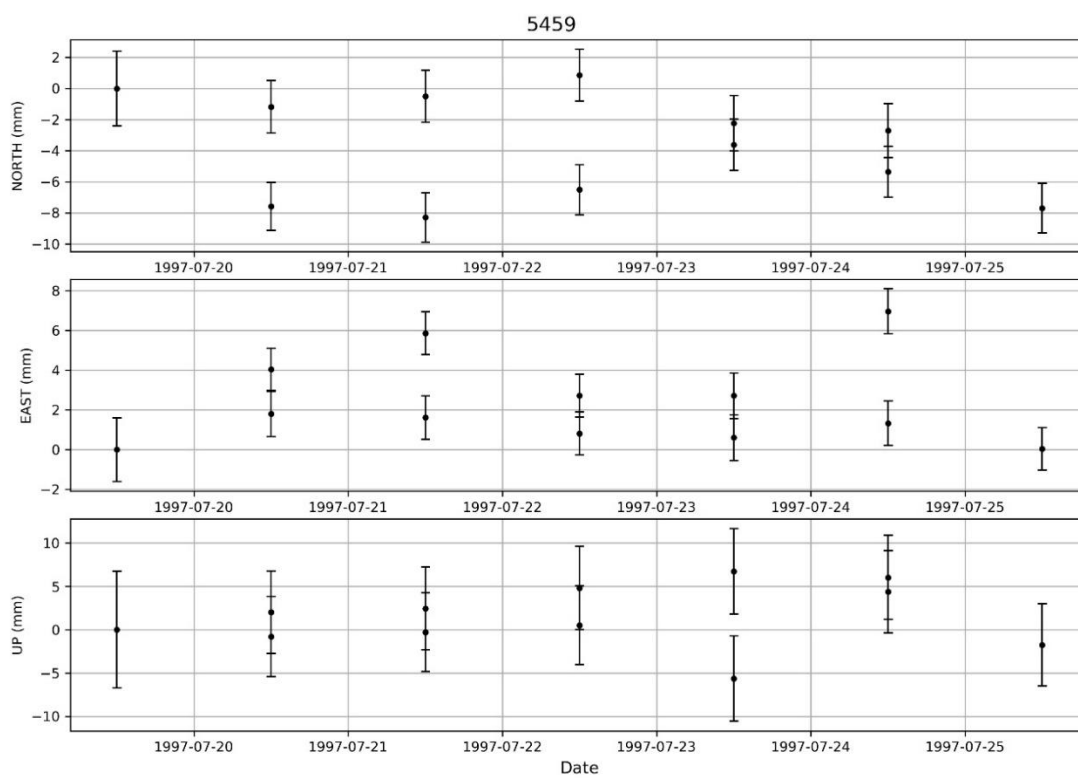
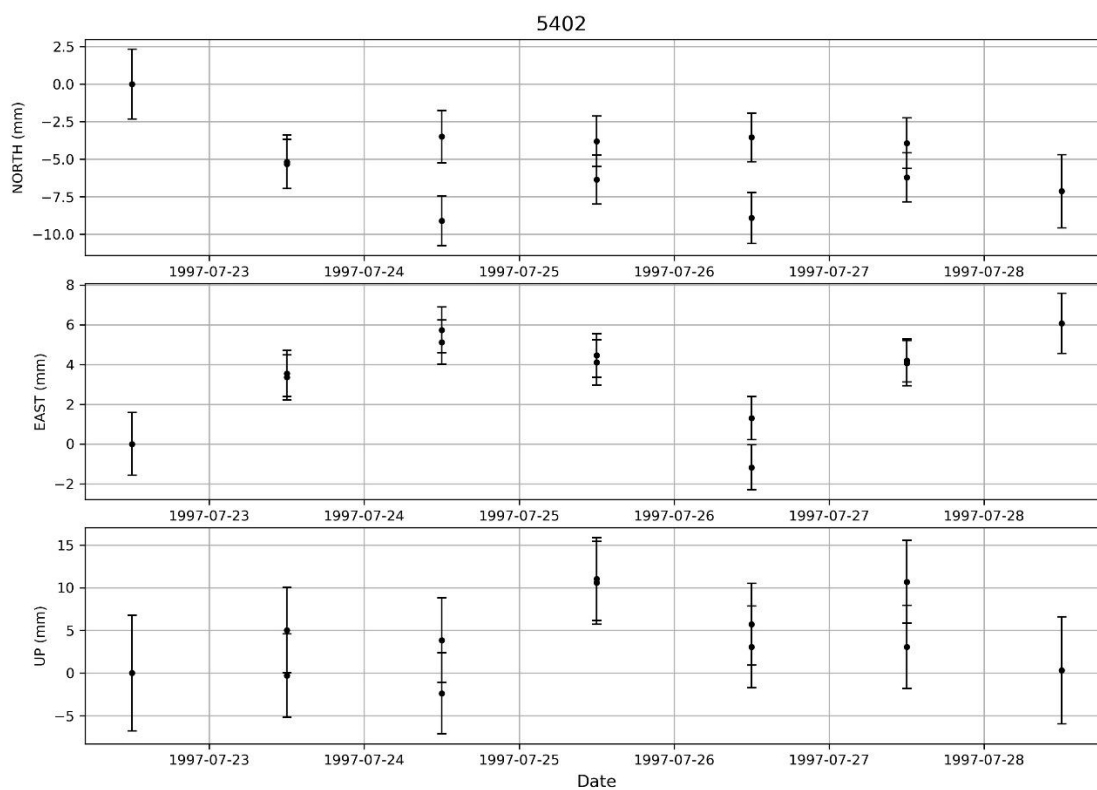
North— põhi, East- ida, Up- vertikaalsuund, Date- kuupäev



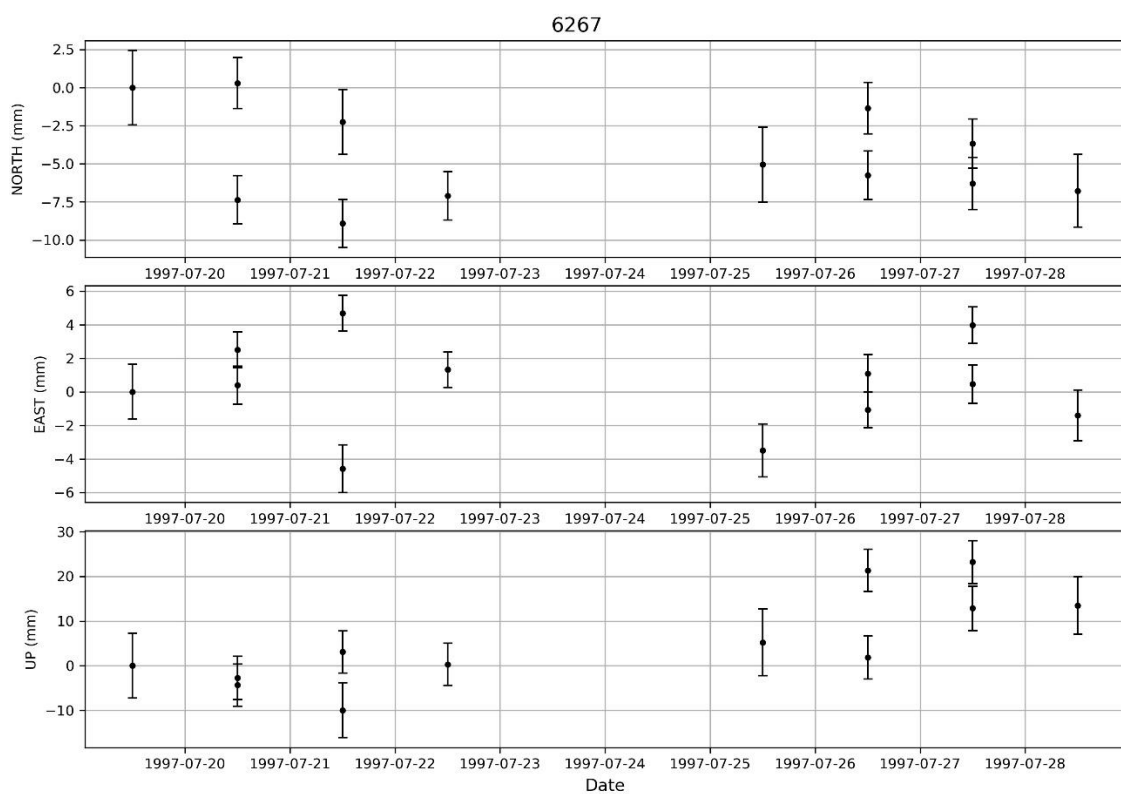
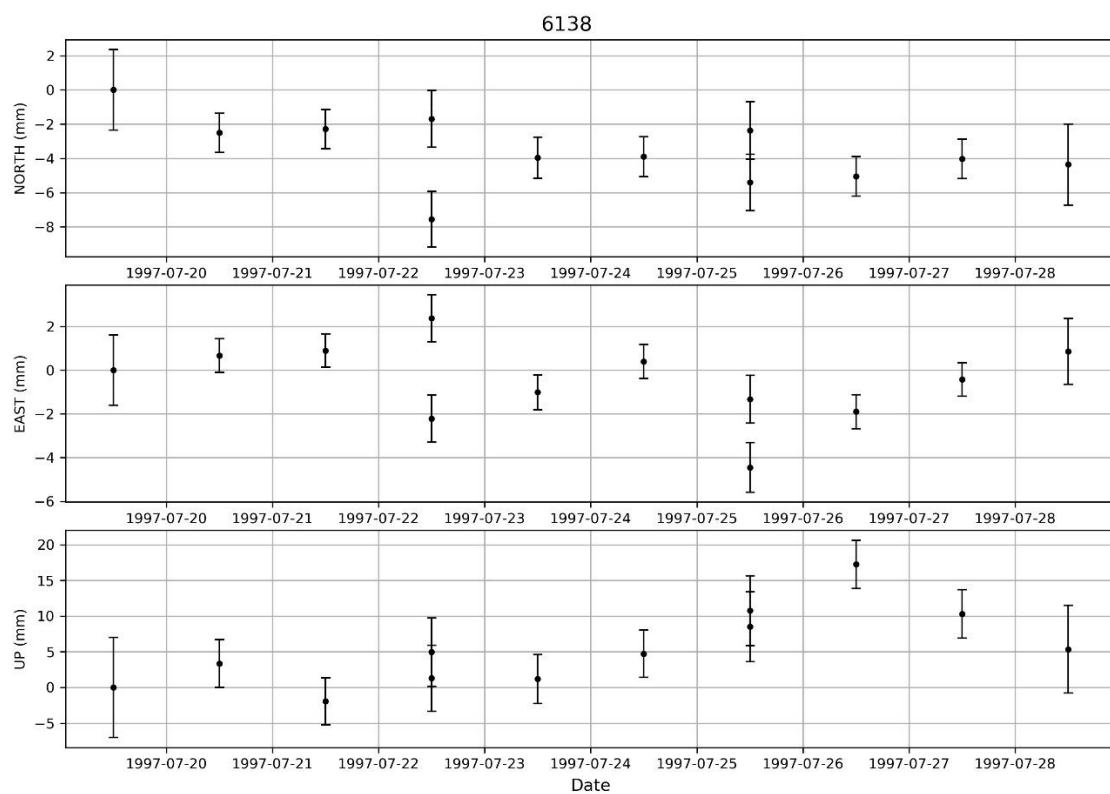
Lisa 1 järg



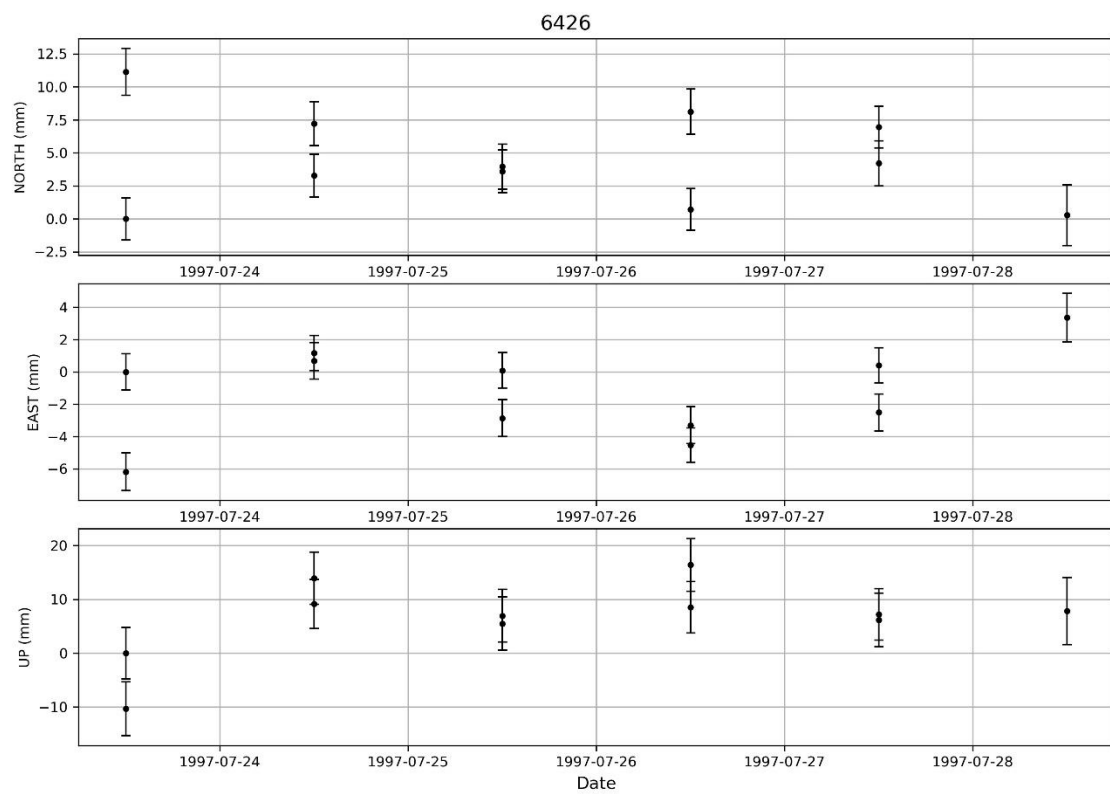
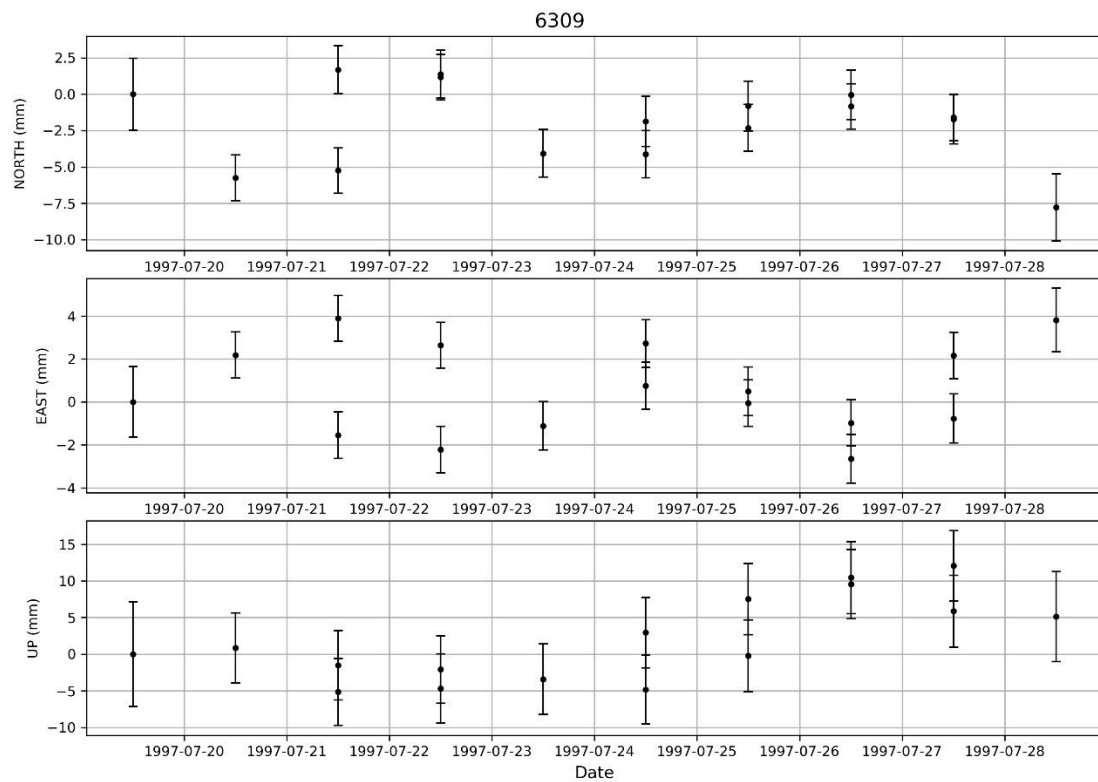
Lisa 1 järg



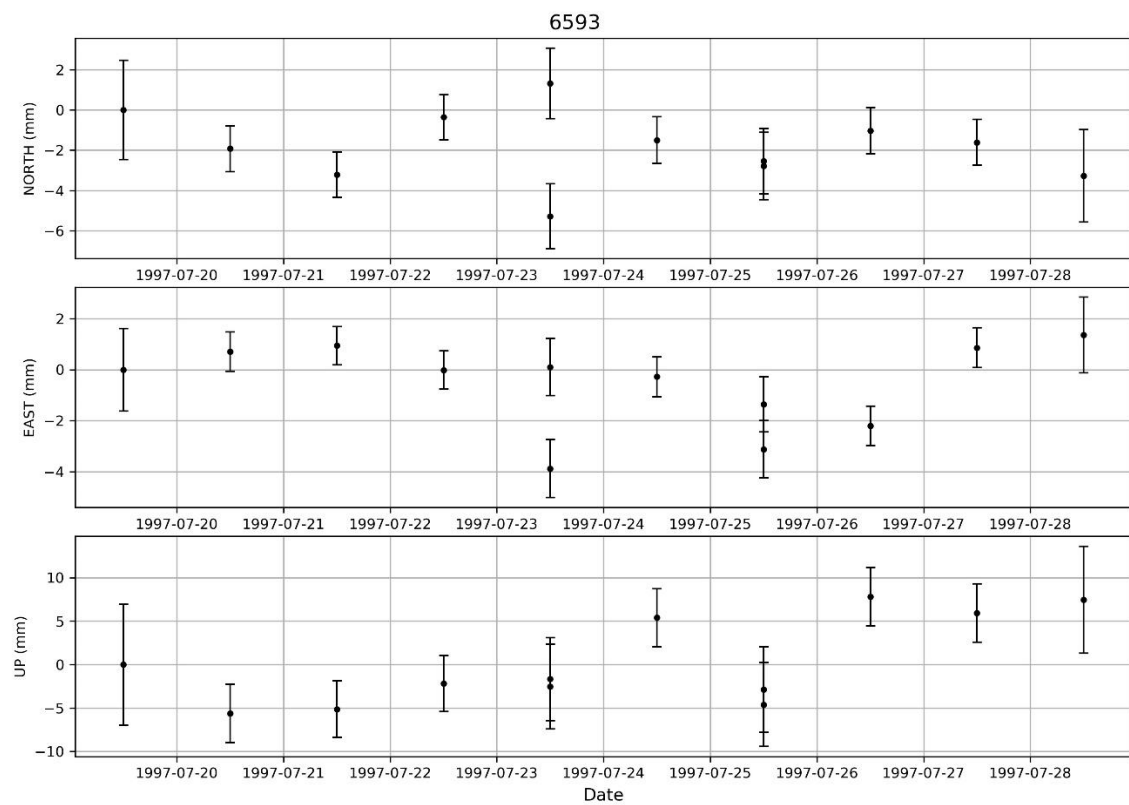
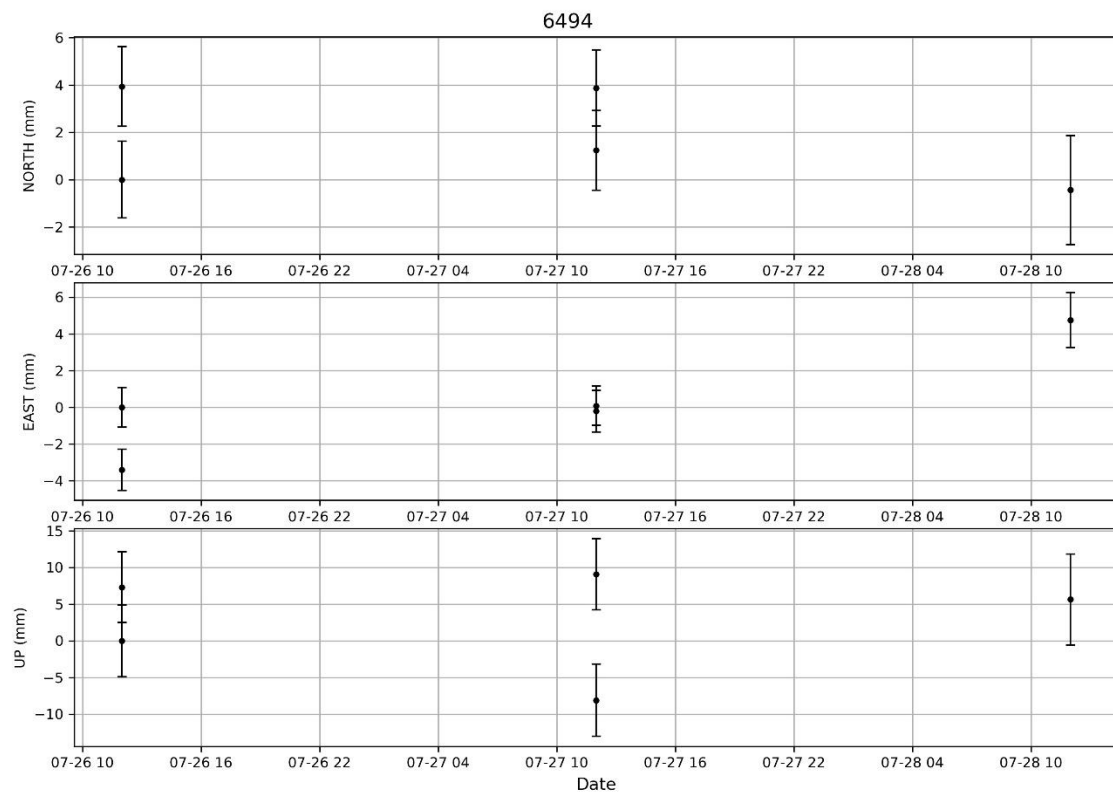
Lisa 1 järg



Lisa 1 järg

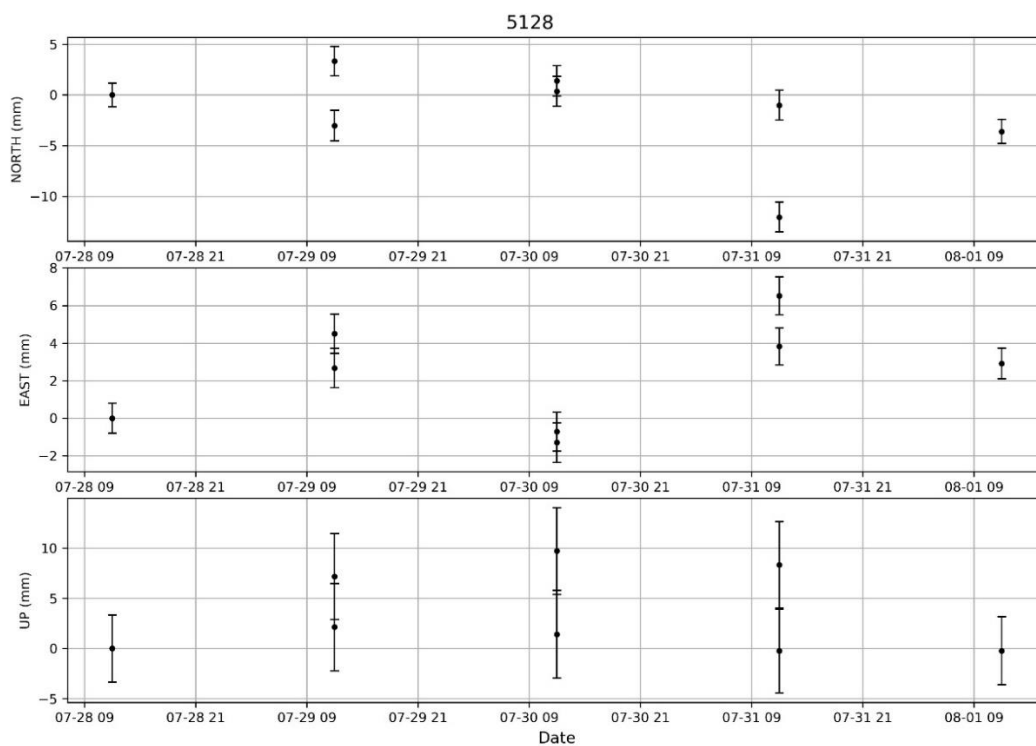
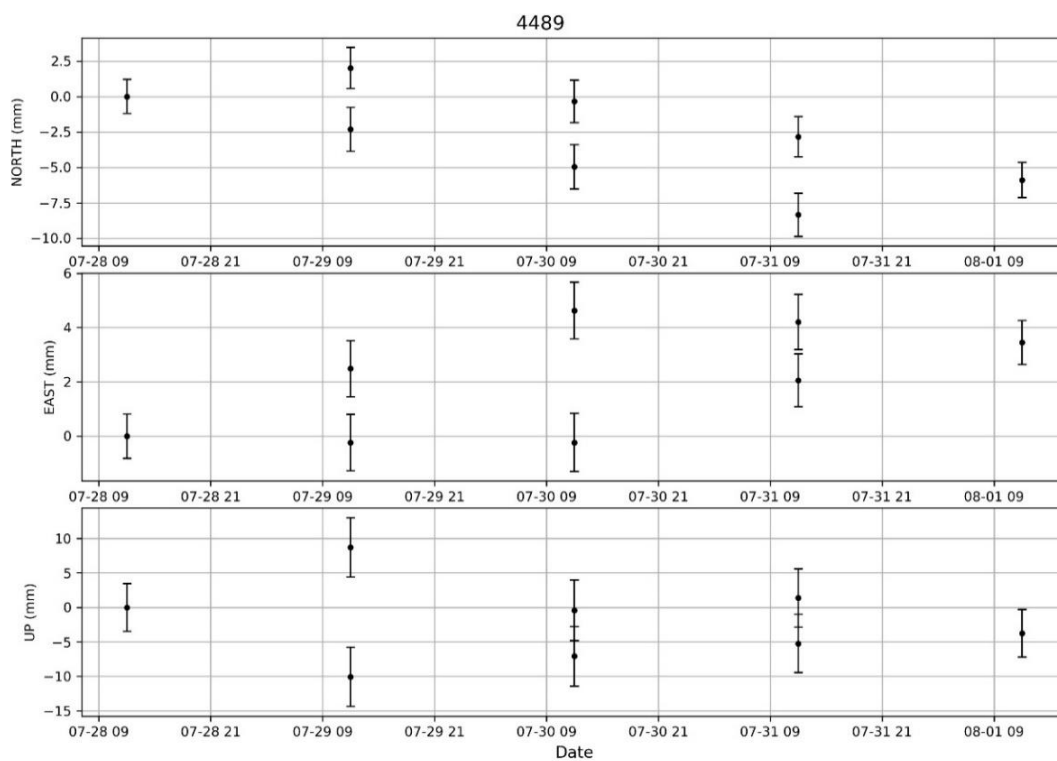


Lisa 1 järg

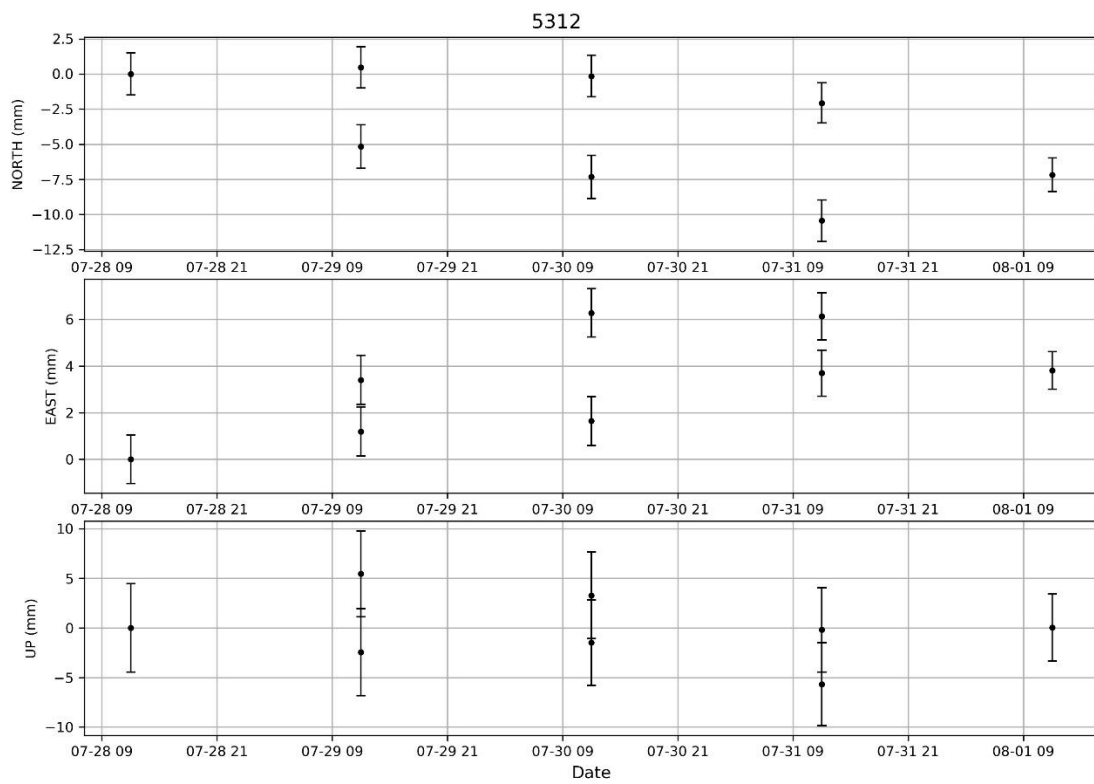
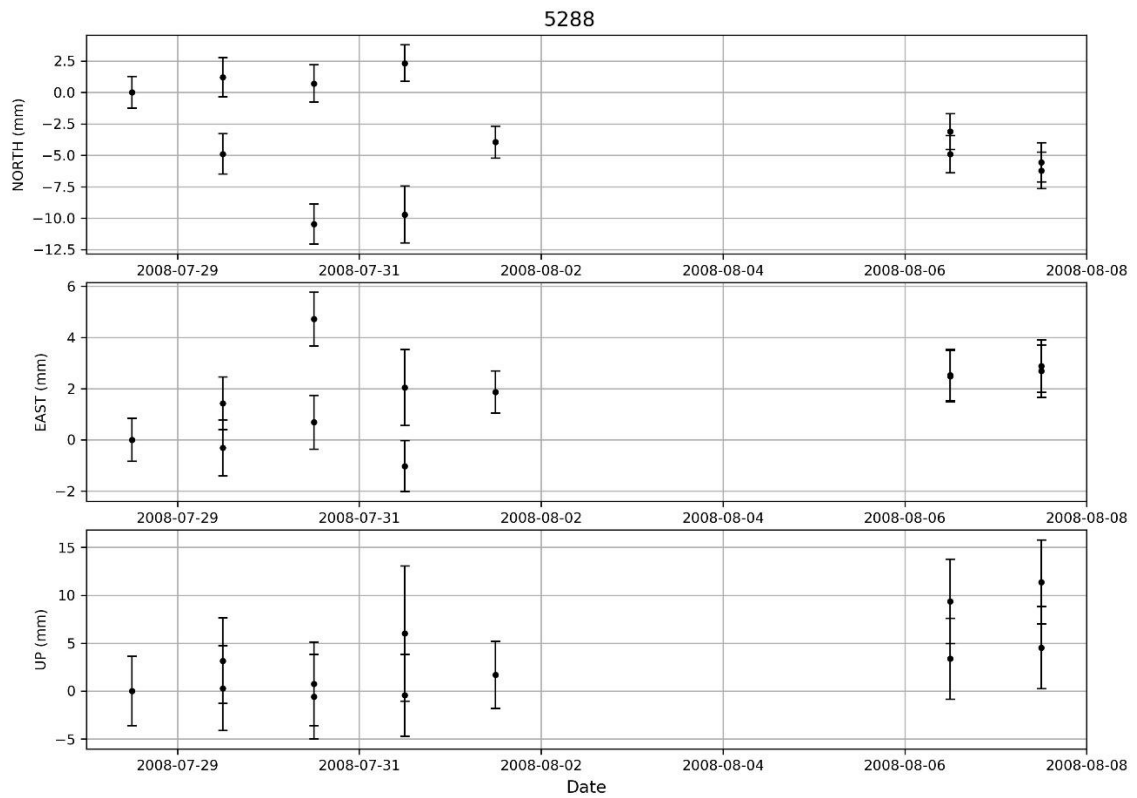


Lisa 2. 2008. a GPS mõõtmiskampaania erinevatest mõõtmisessioonidest arvutatud topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegread riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide kaupa

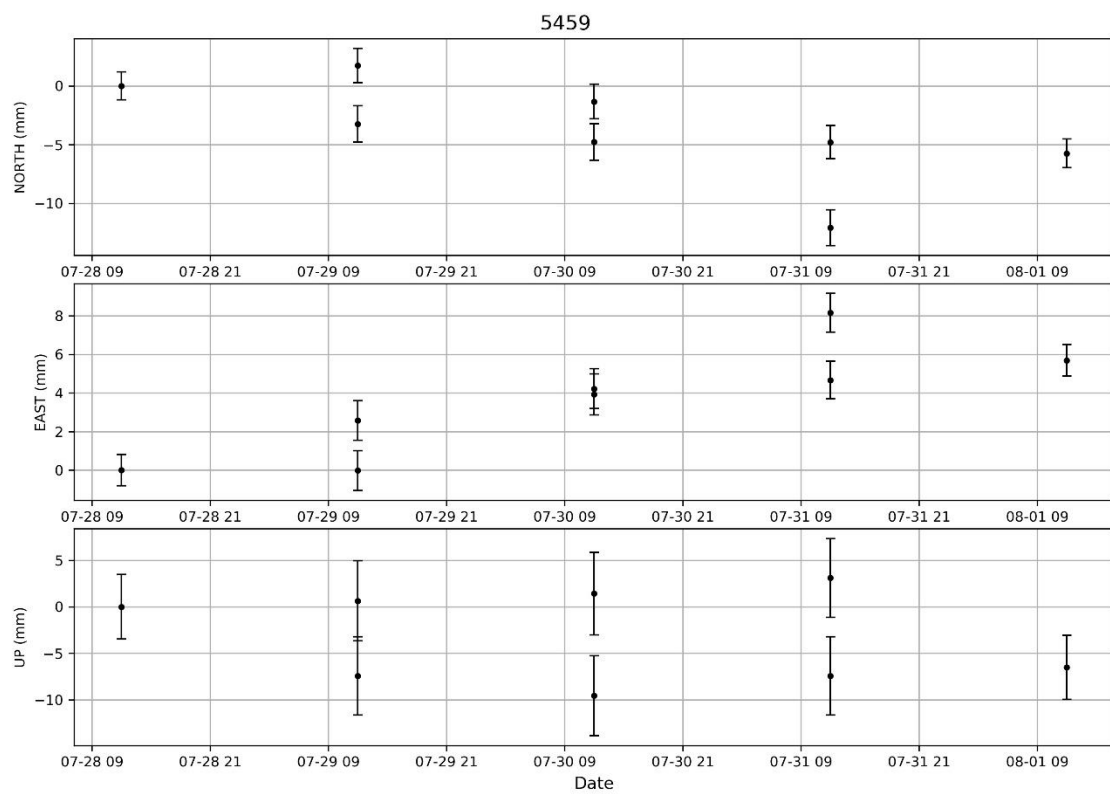
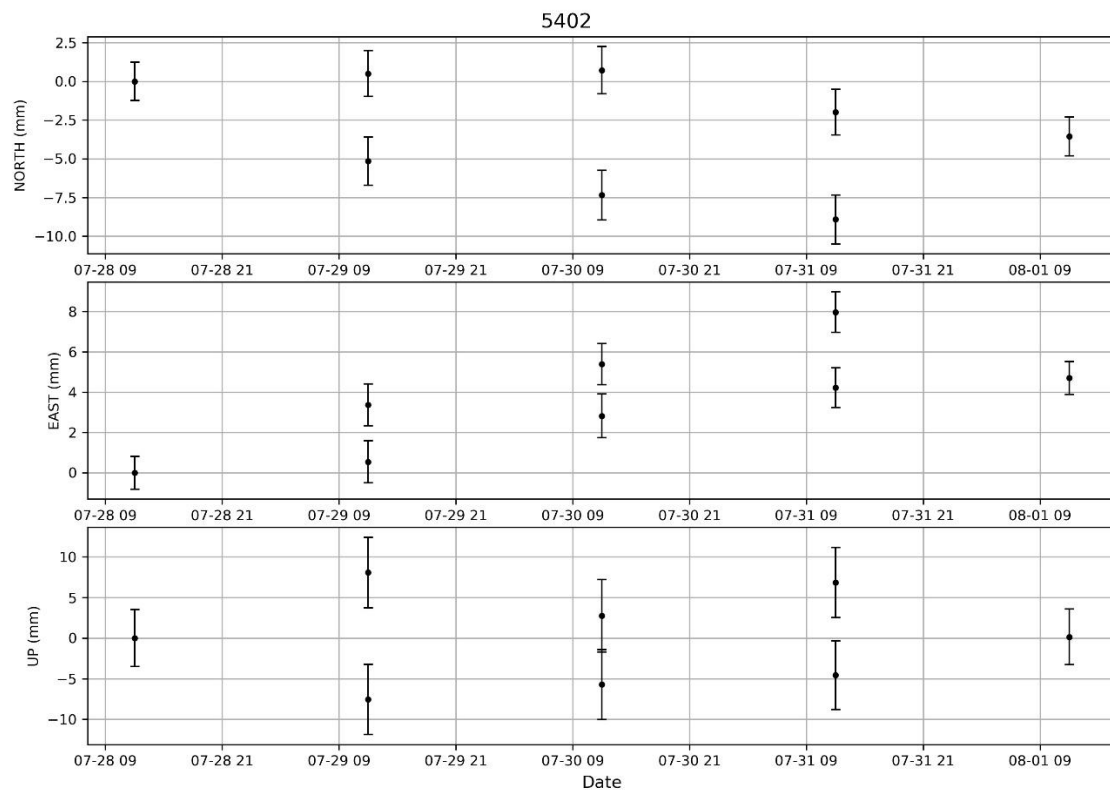
North— põhi, East- ida, Up- vertikaalsuund, Date- kuupäev



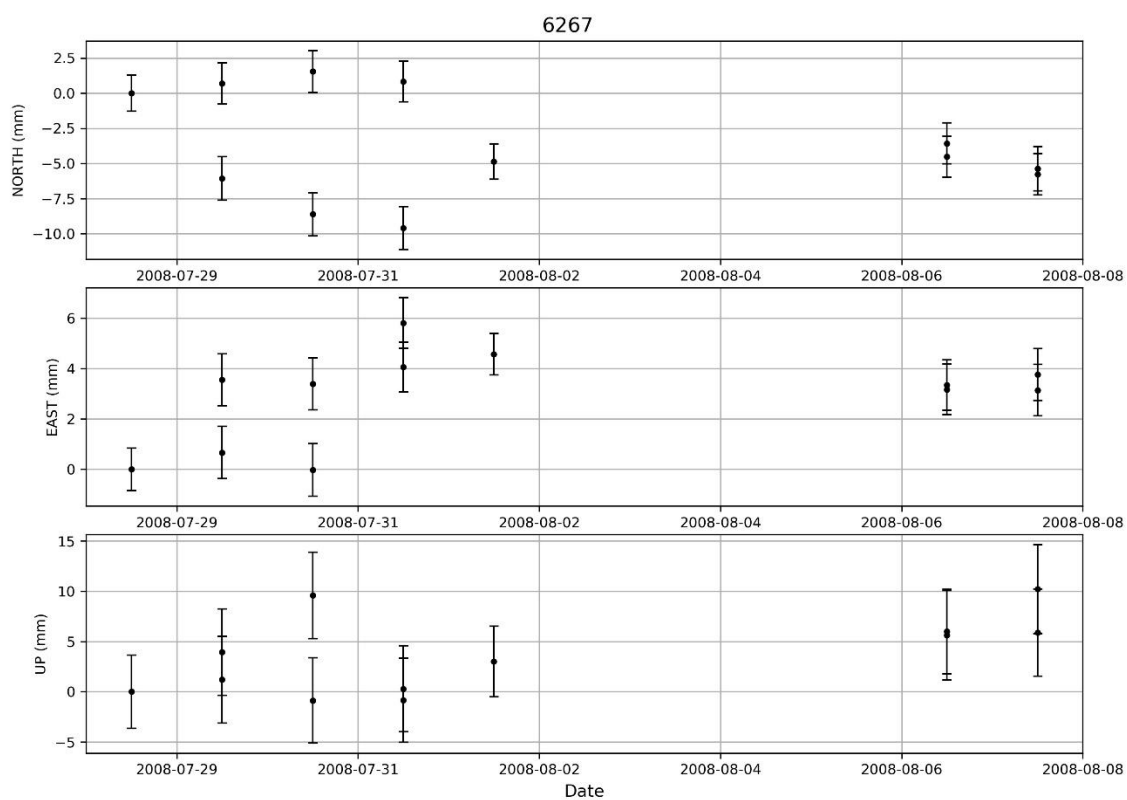
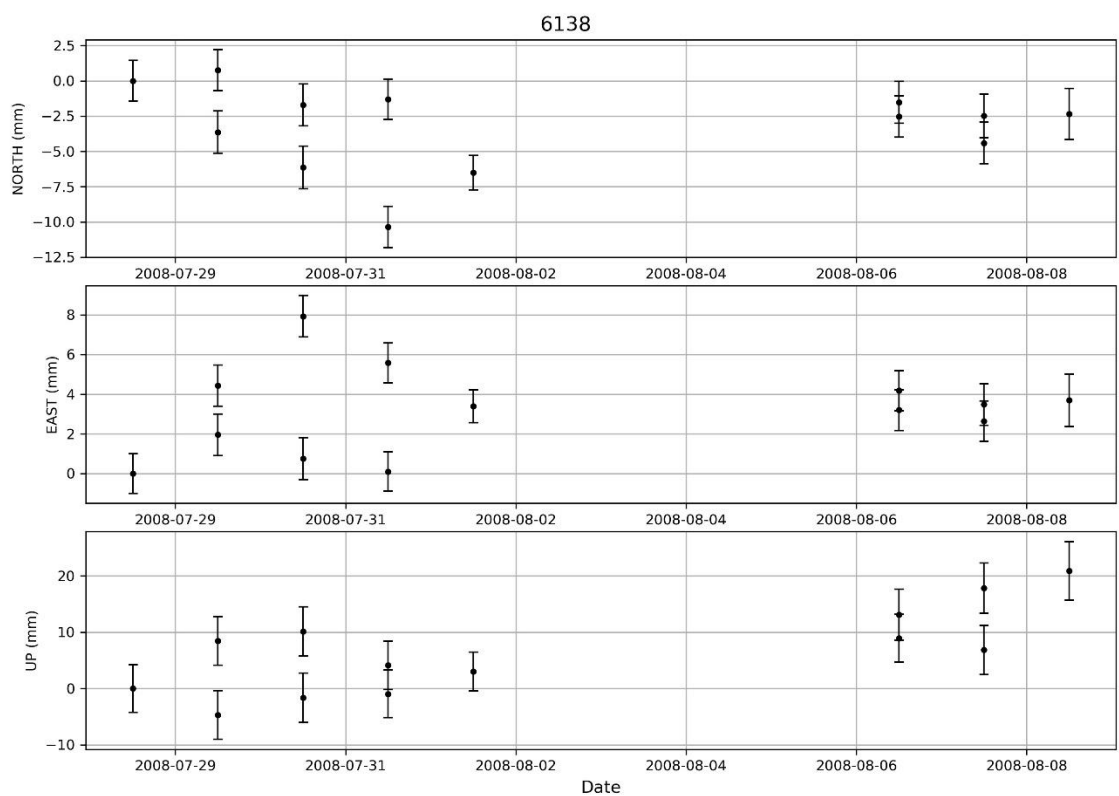
Lisa 2 järg



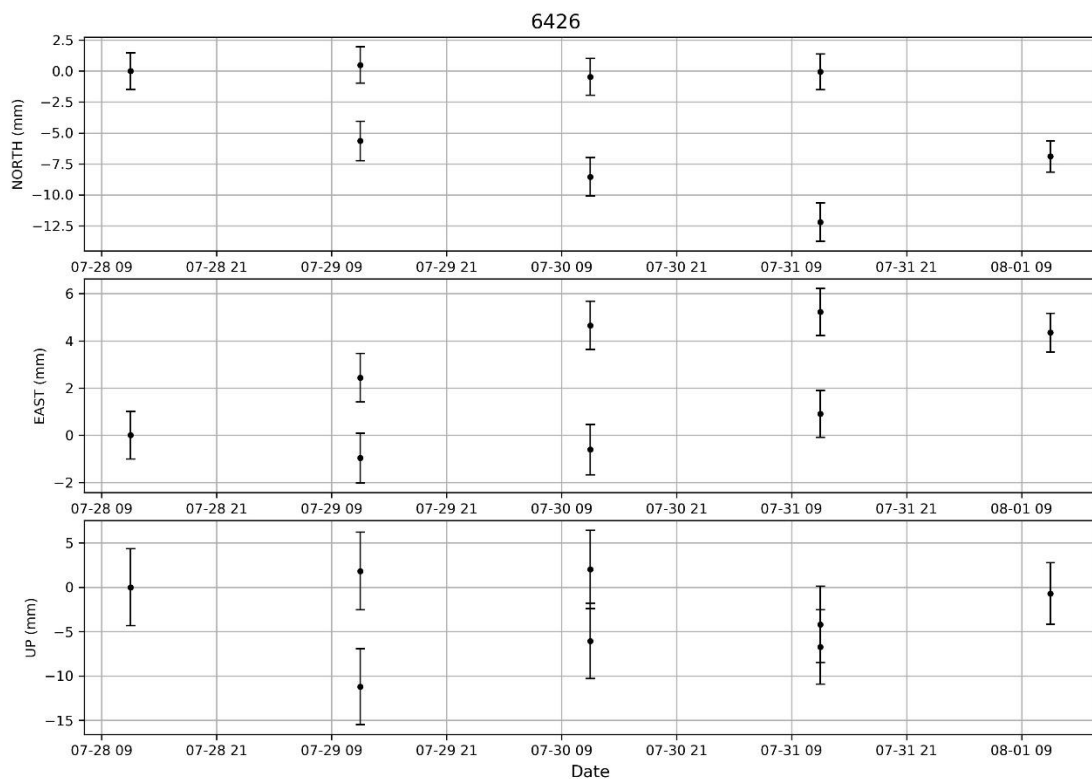
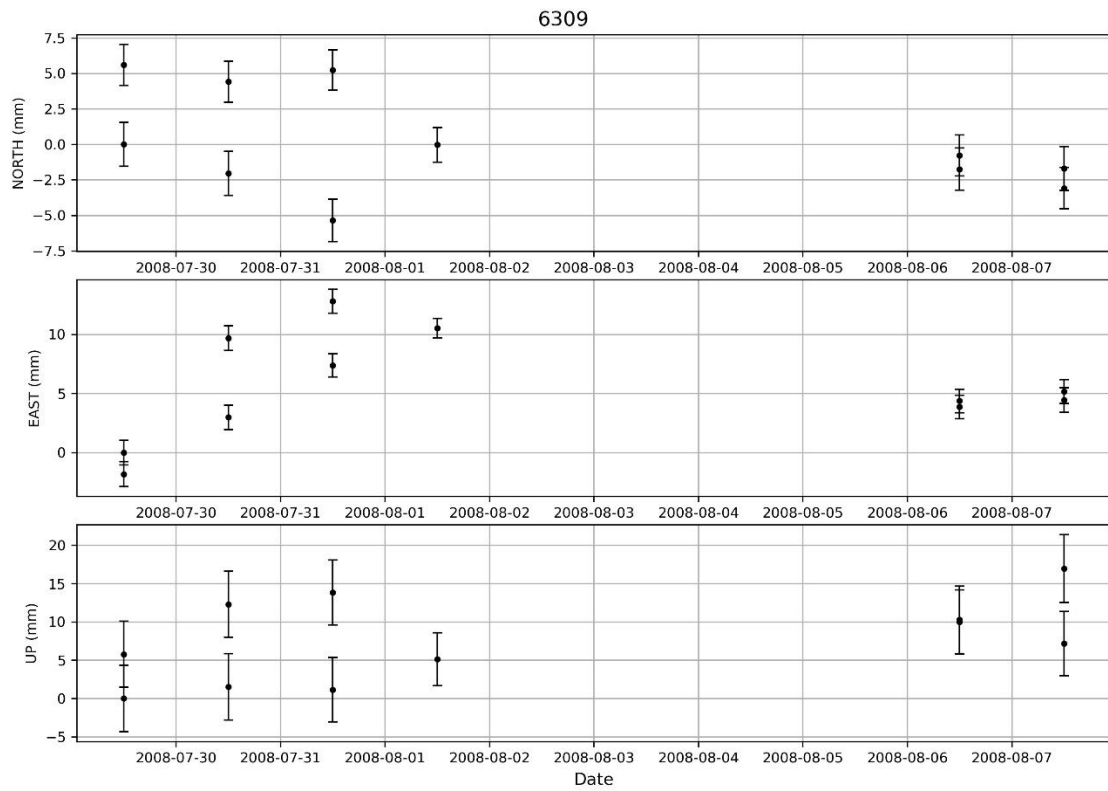
Lisa 2 järg



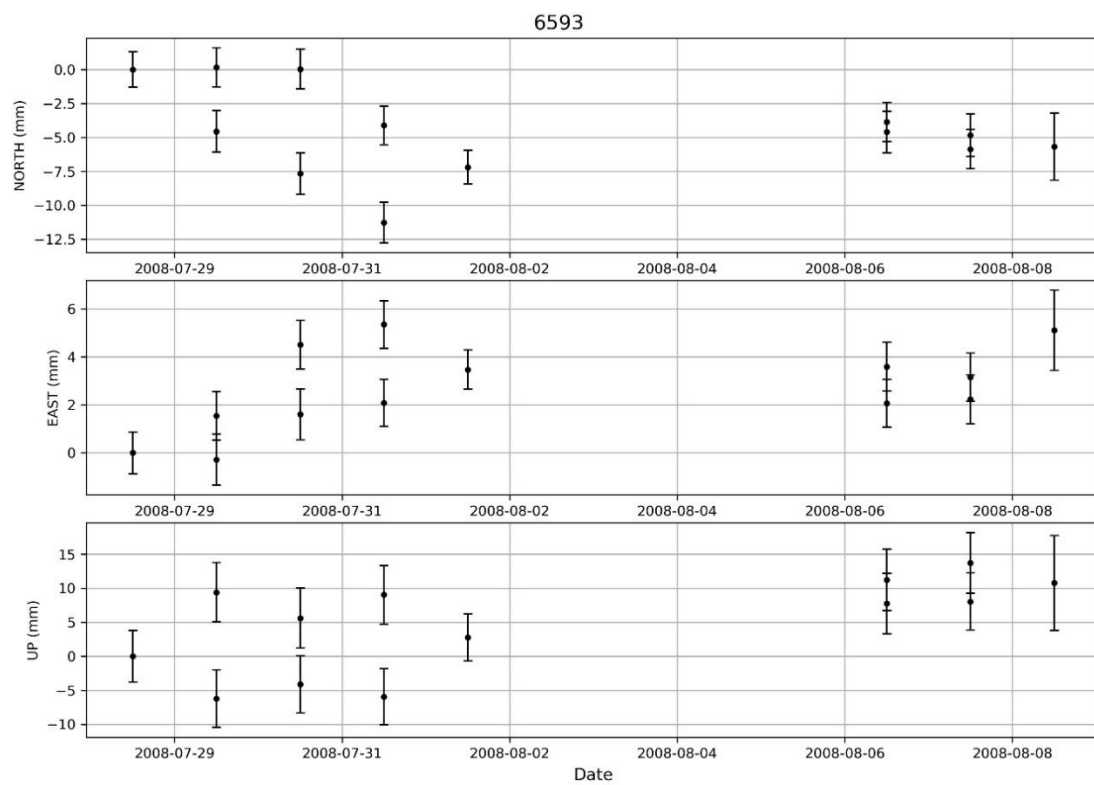
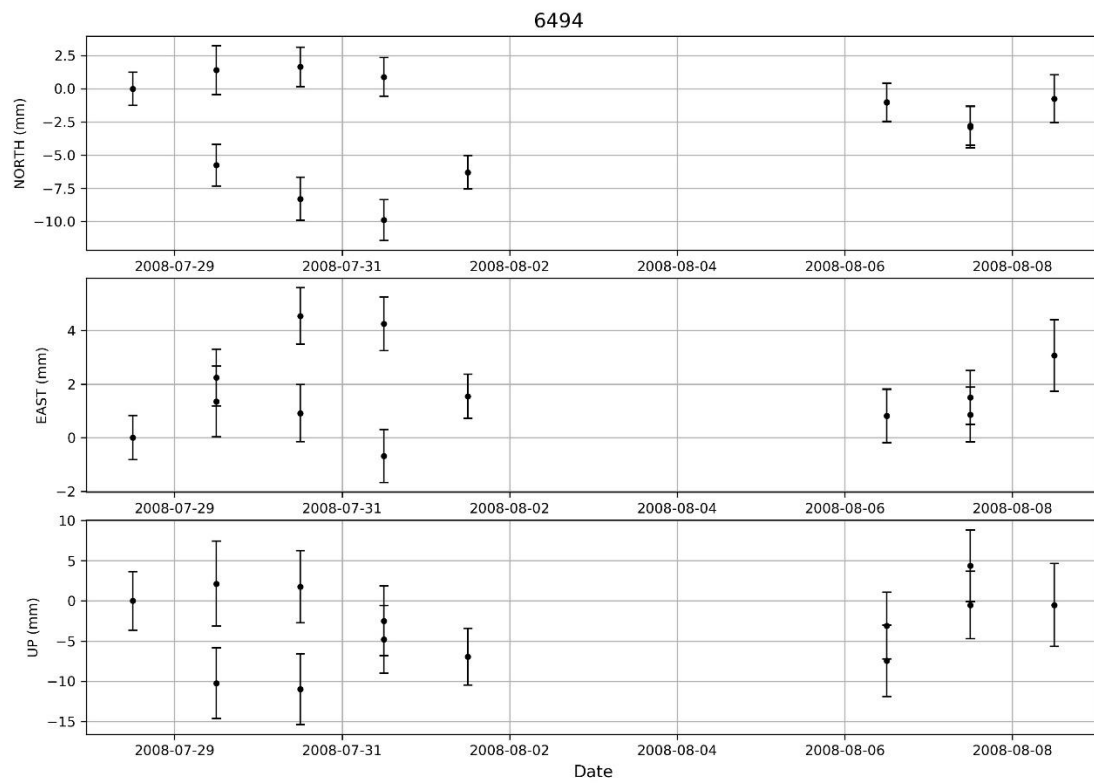
Lisa 2 järg



Lisa 2 järg

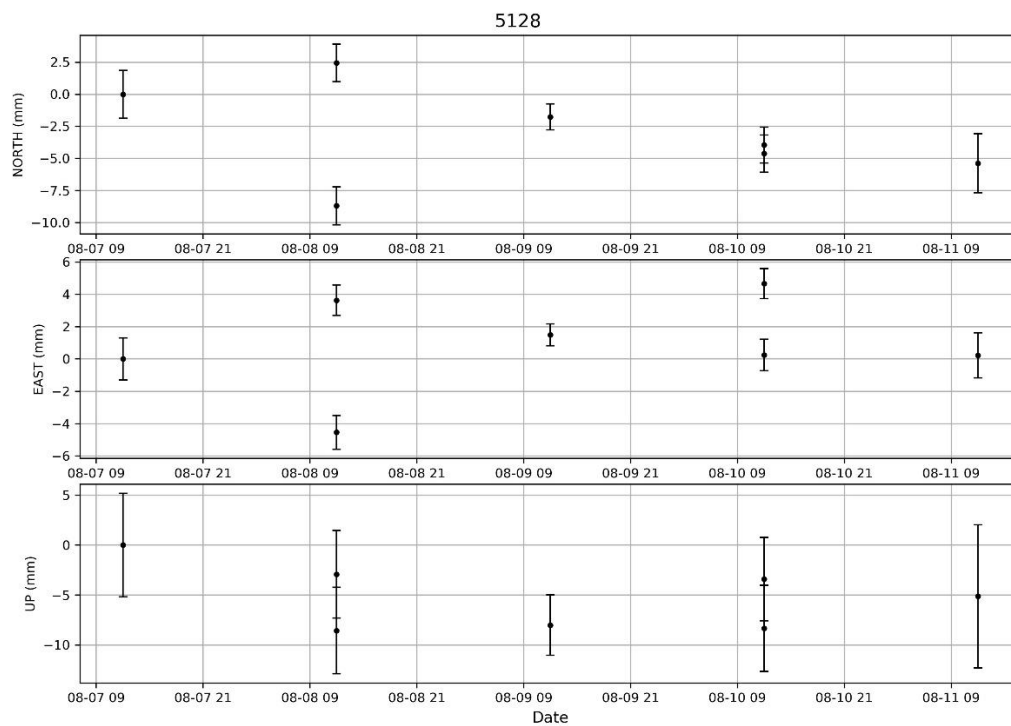
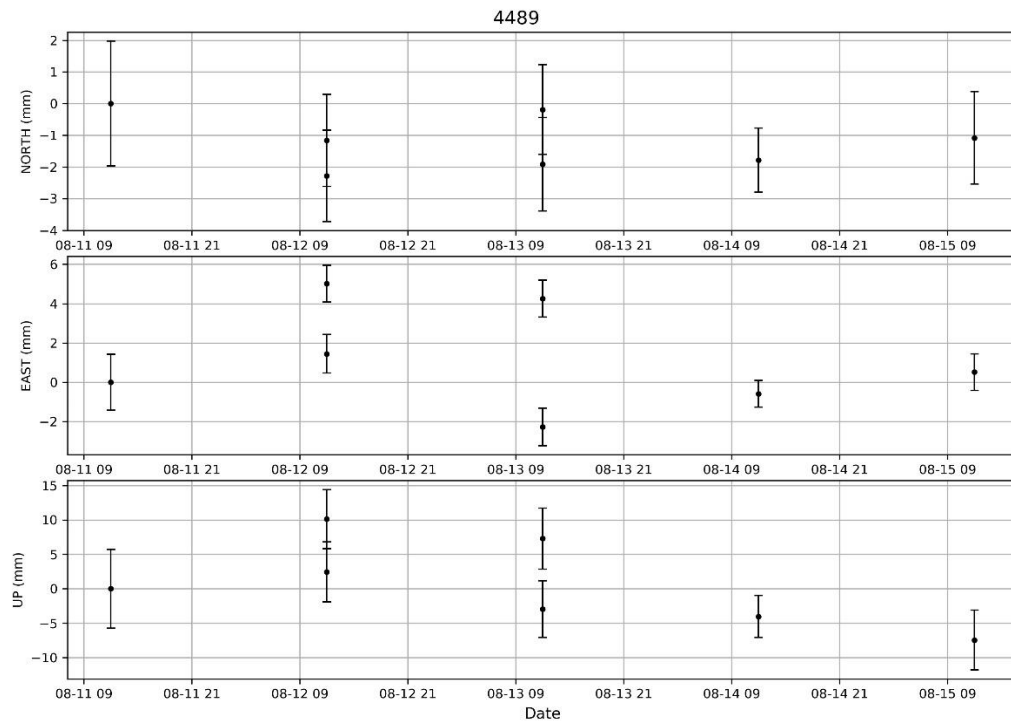


Lisa 2 järg

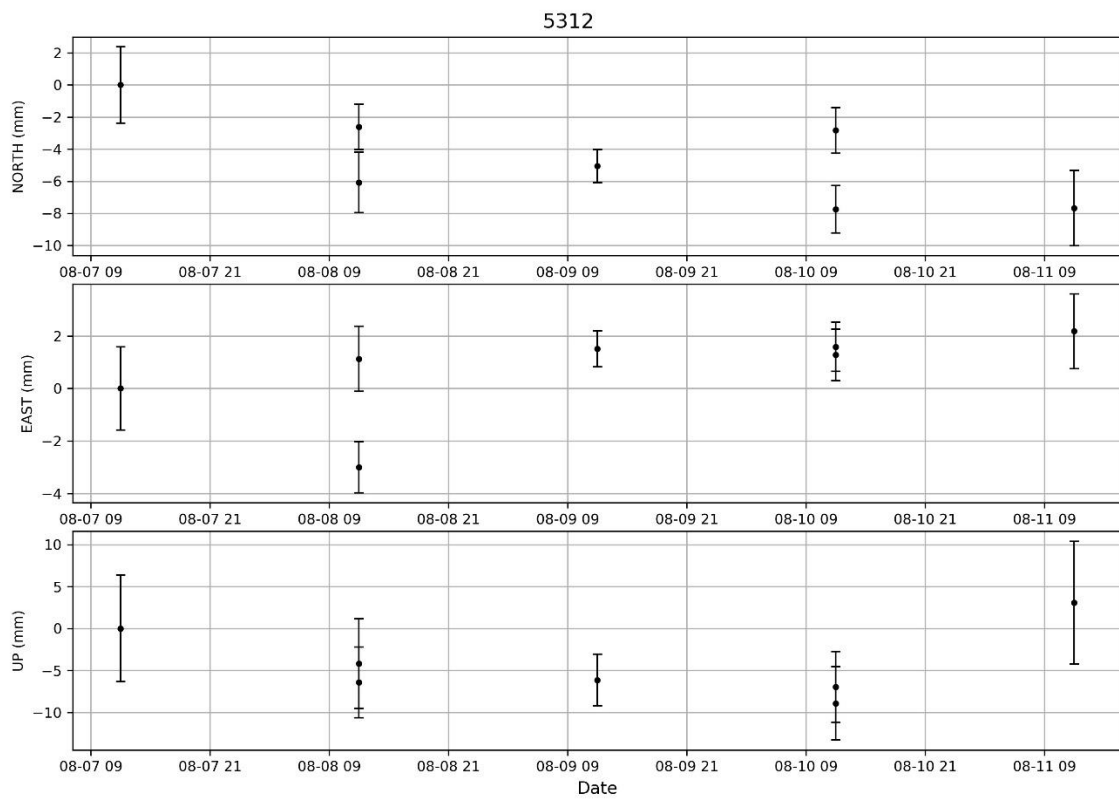
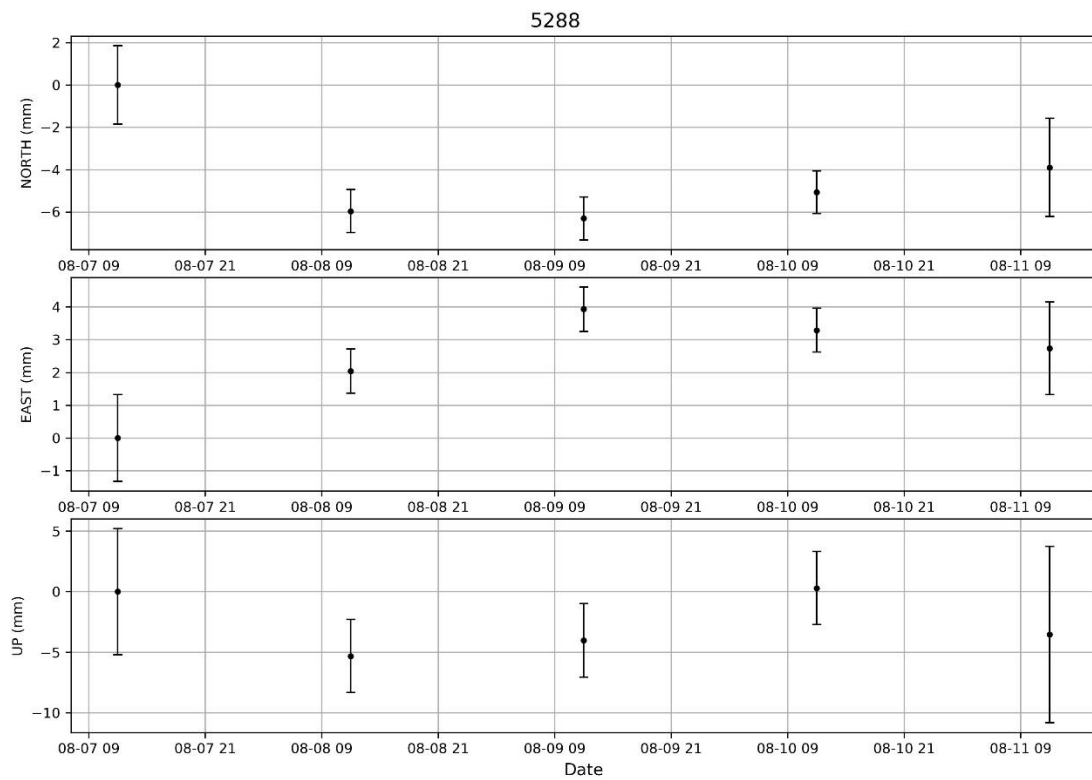


**Lisa 3. 2017. a GNSS mõõtmiskampaania erinevatest mõõtmisessioonidest arvatatud
topotsentriliste ristkoordinaatide NEU aegread riikliku geodeetilise võrgu I
klassi punktide kaupa**

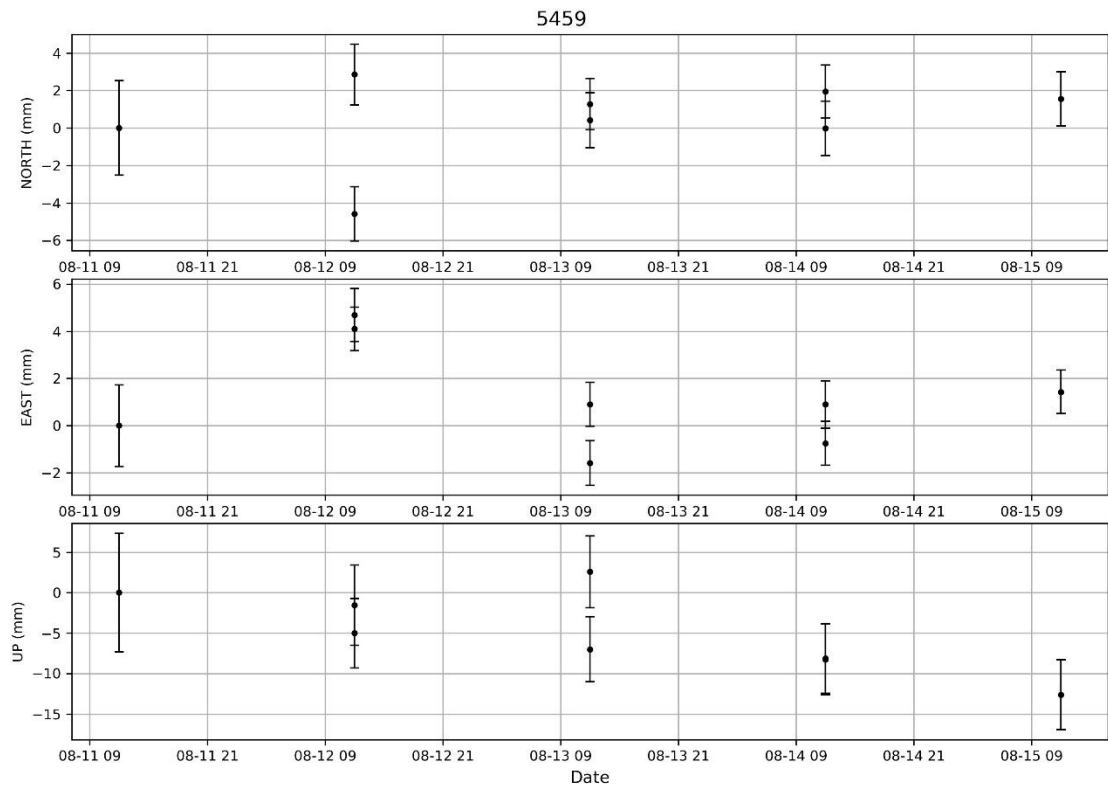
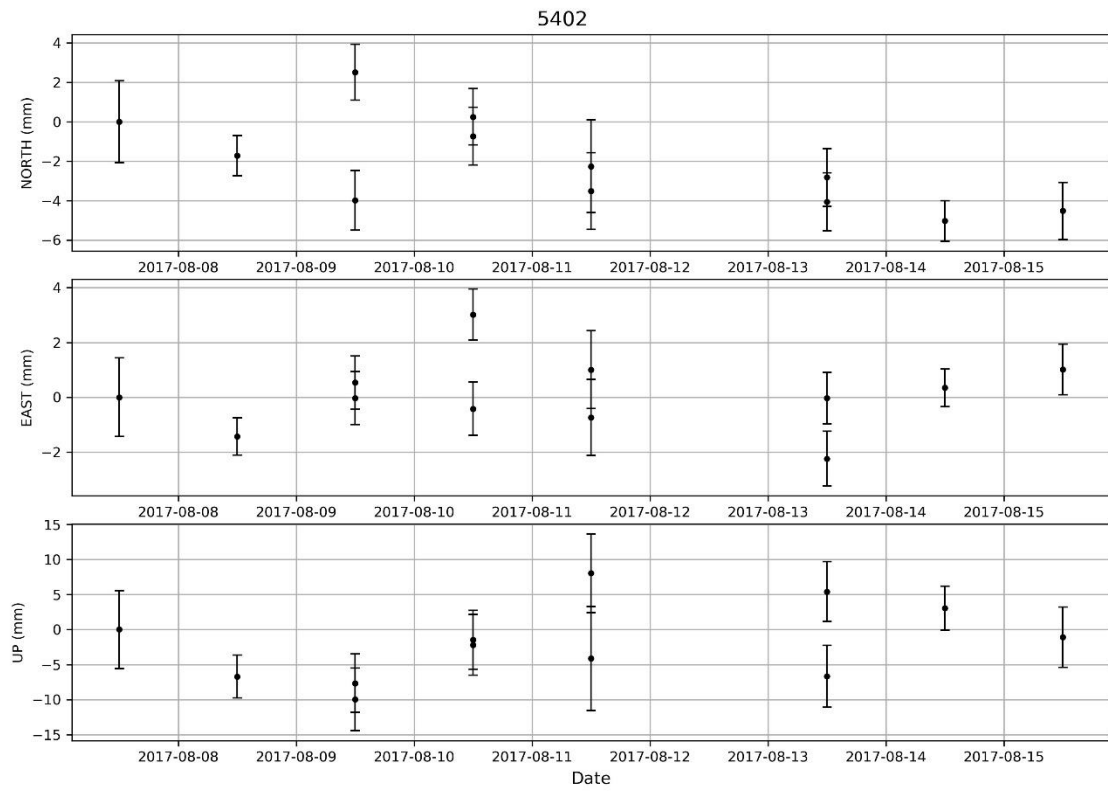
North— põhi, East- ida, Up- vertikaalsuund, Date- kuupäev



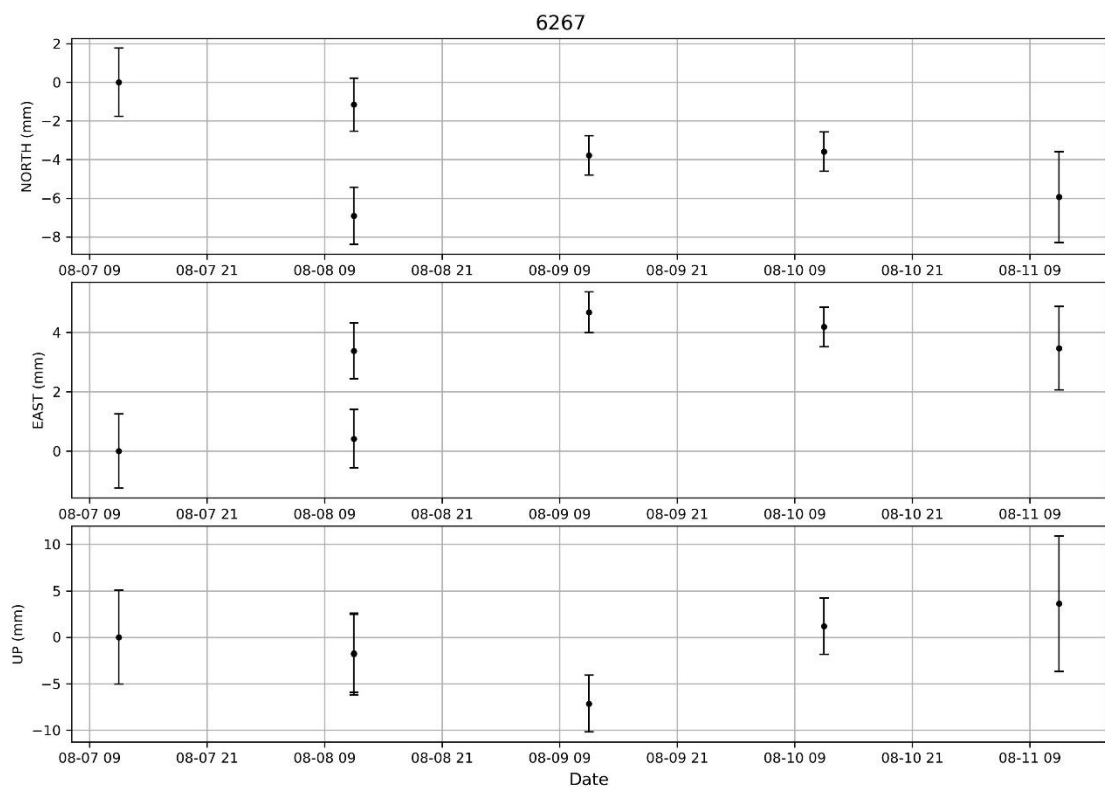
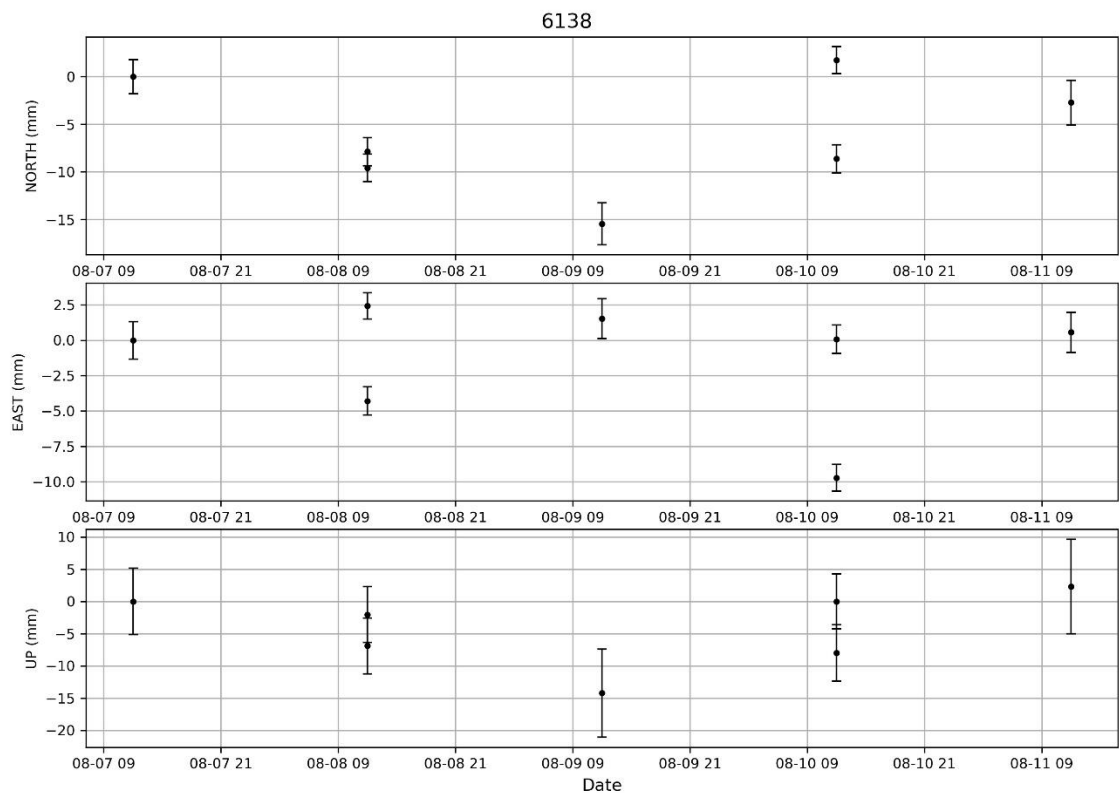
Lisa 3 järg



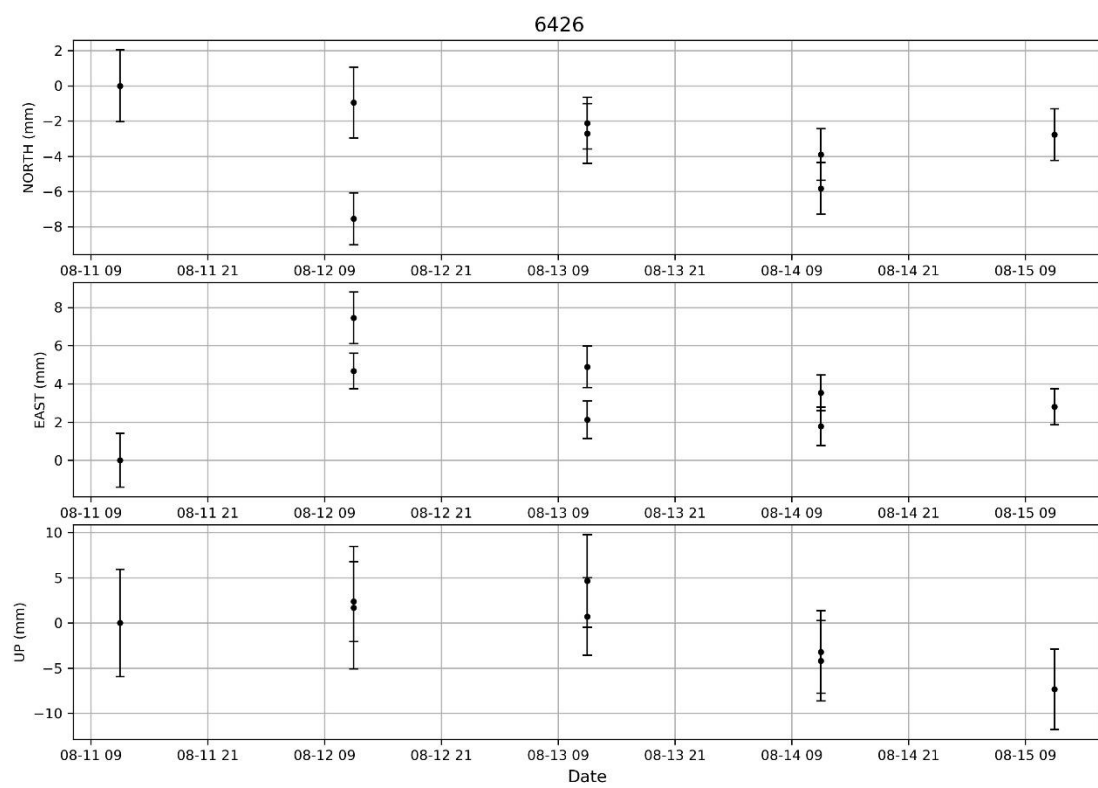
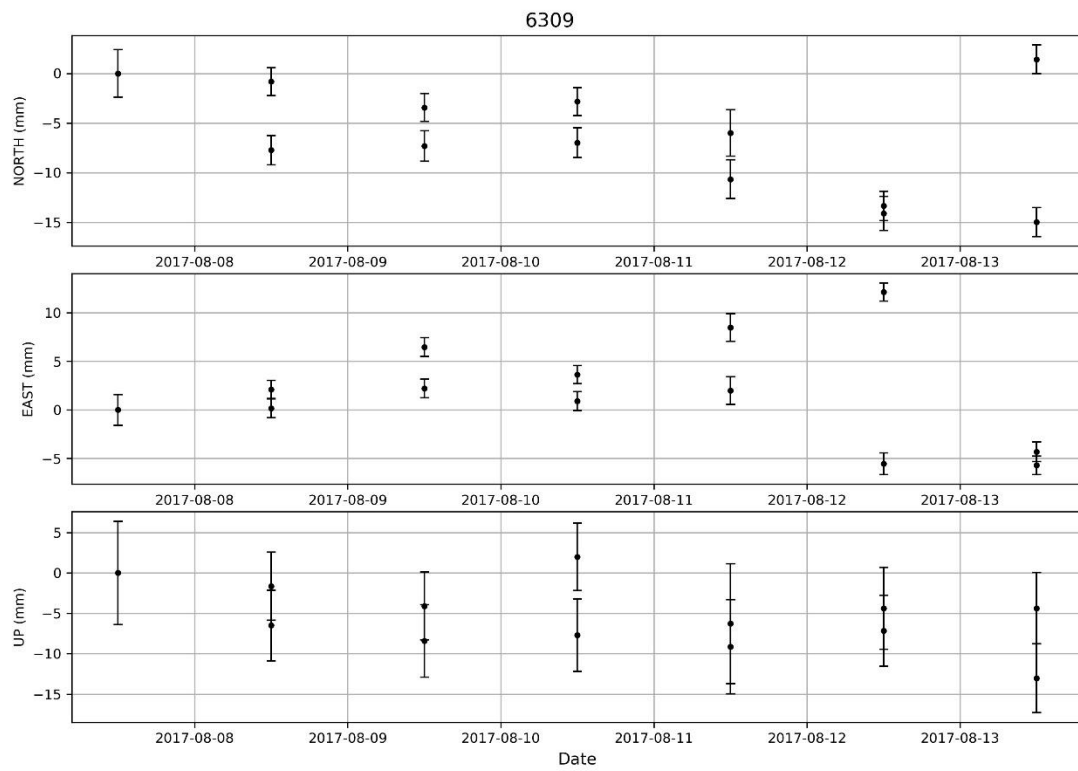
Lisa 3 järg



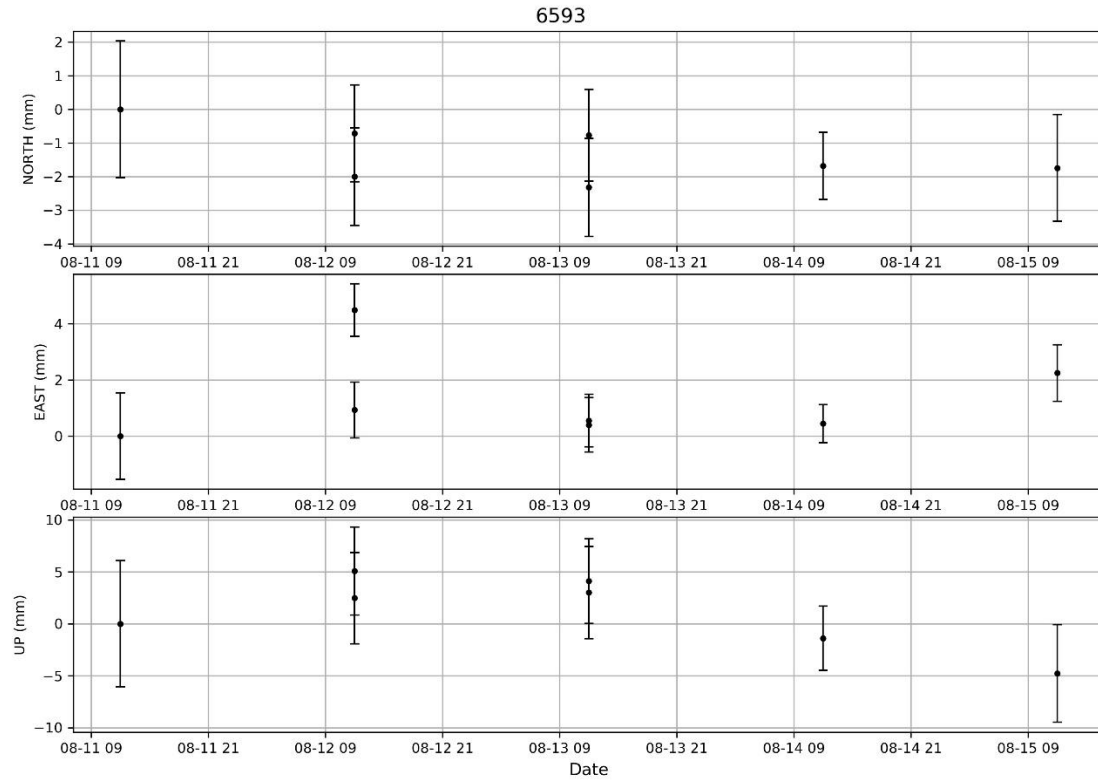
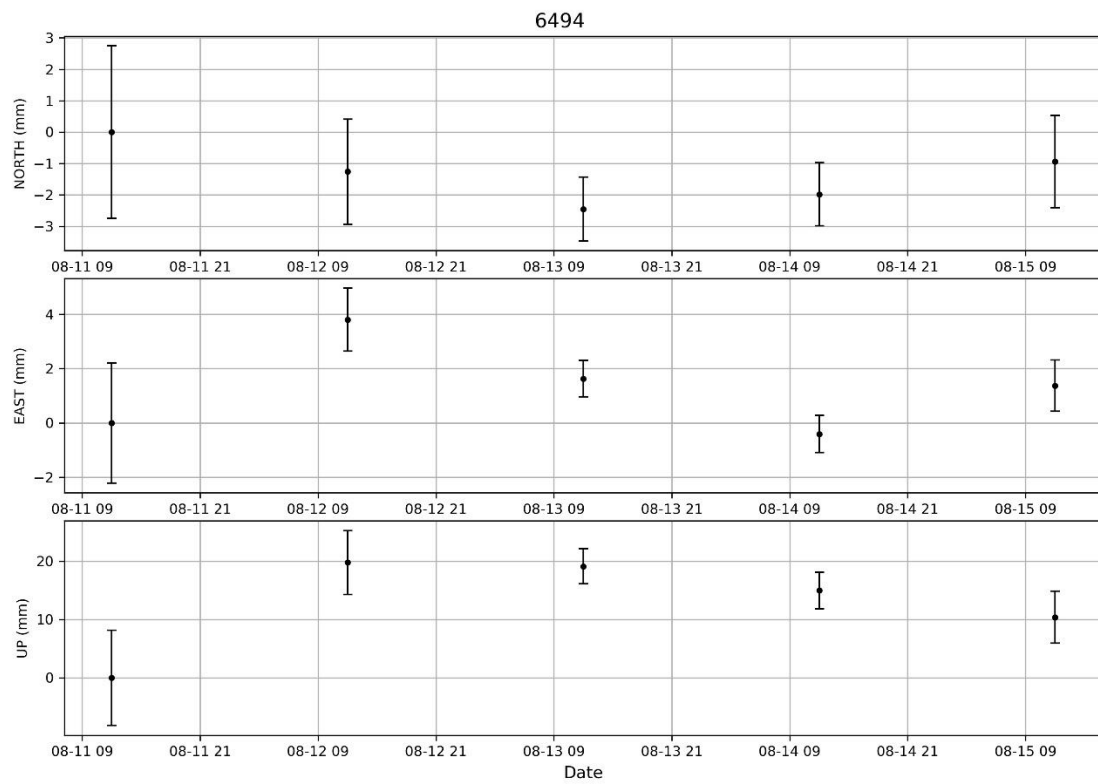
Lisa 3 järg



Lisa 3 järg

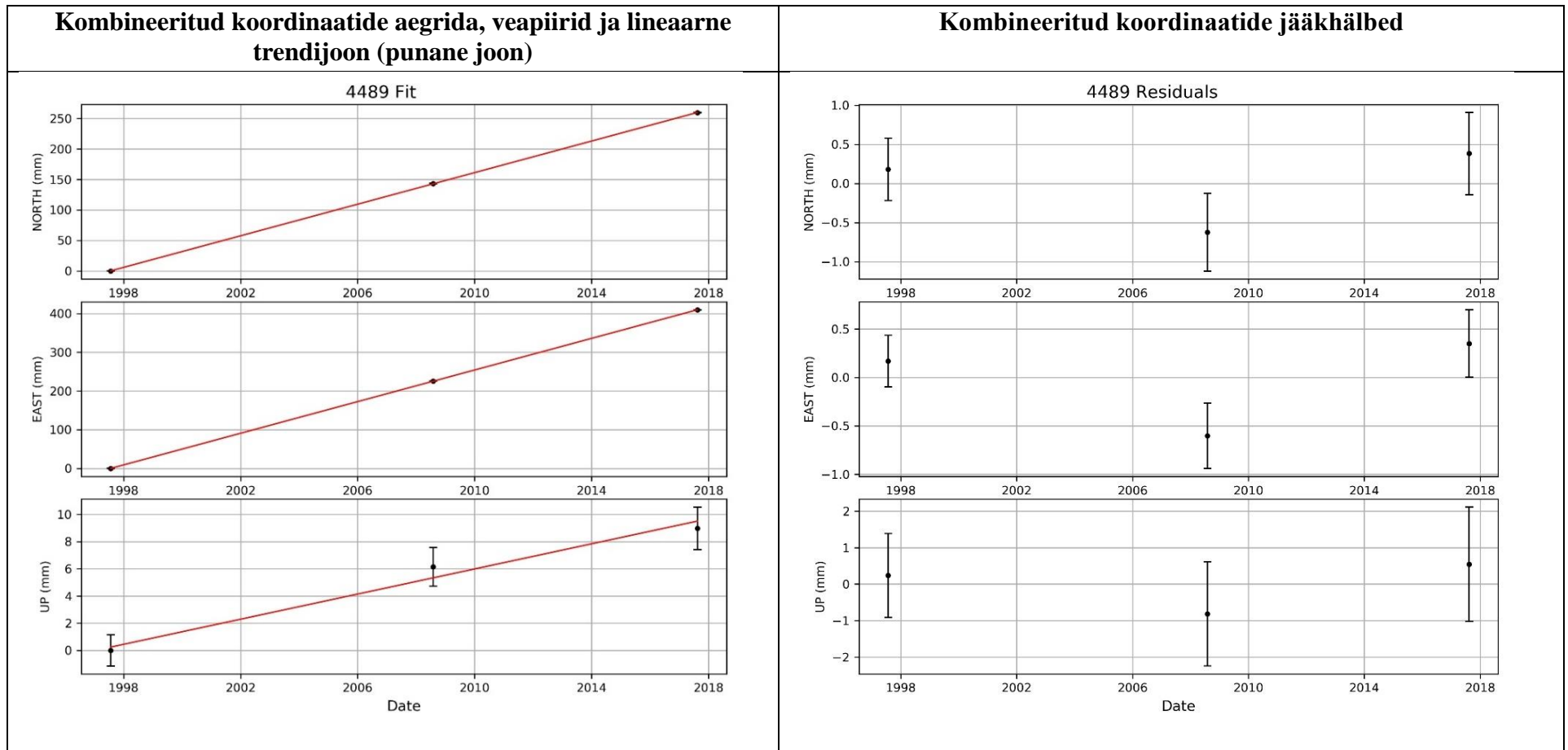


Lisa 3 järg

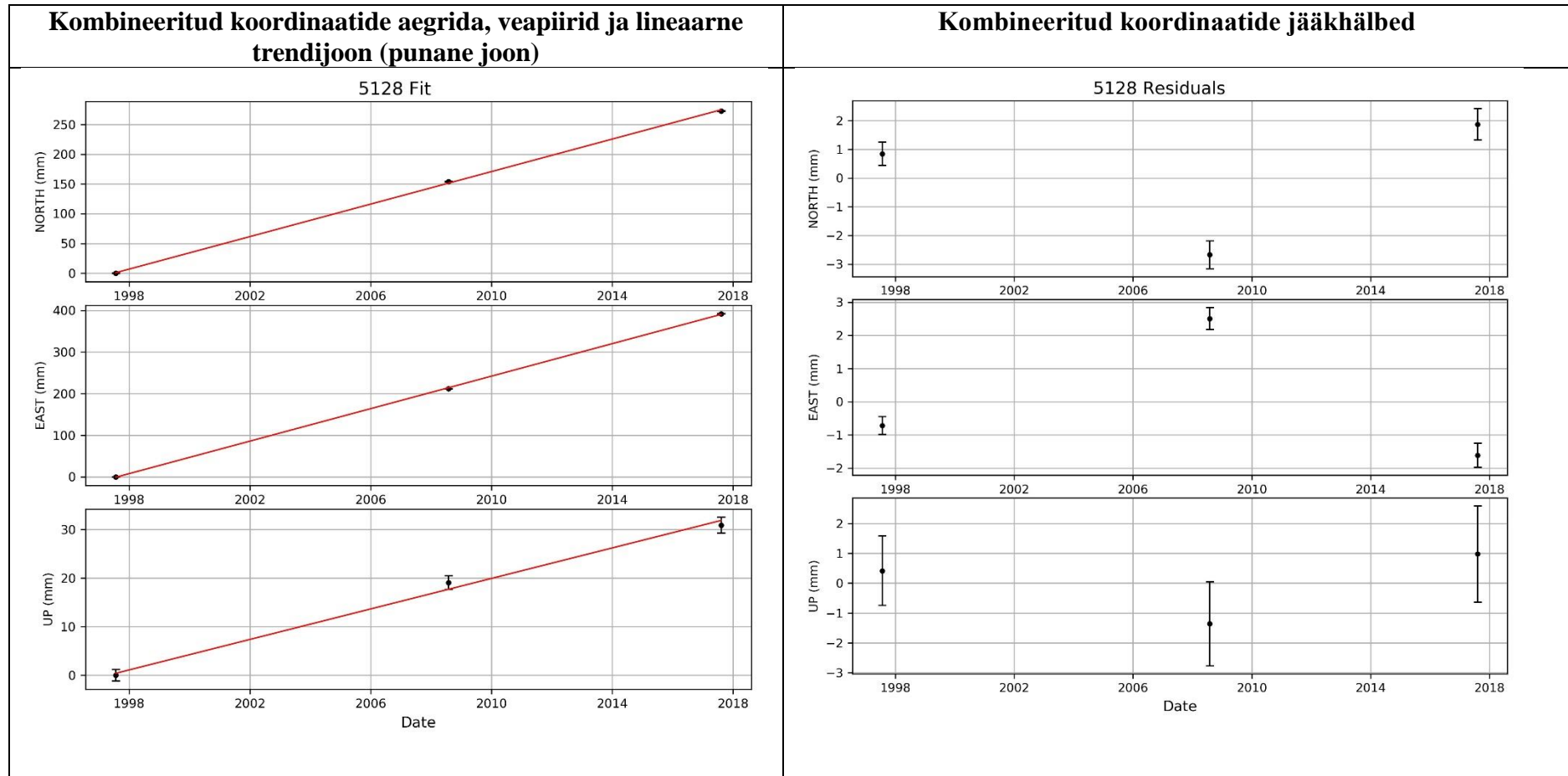


Lisa 4. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide 1997., 2008. ja 2017. a GNSS mõõtmiskampaaniate kombineeritud koordinaatide aegread ning jääkhälbed

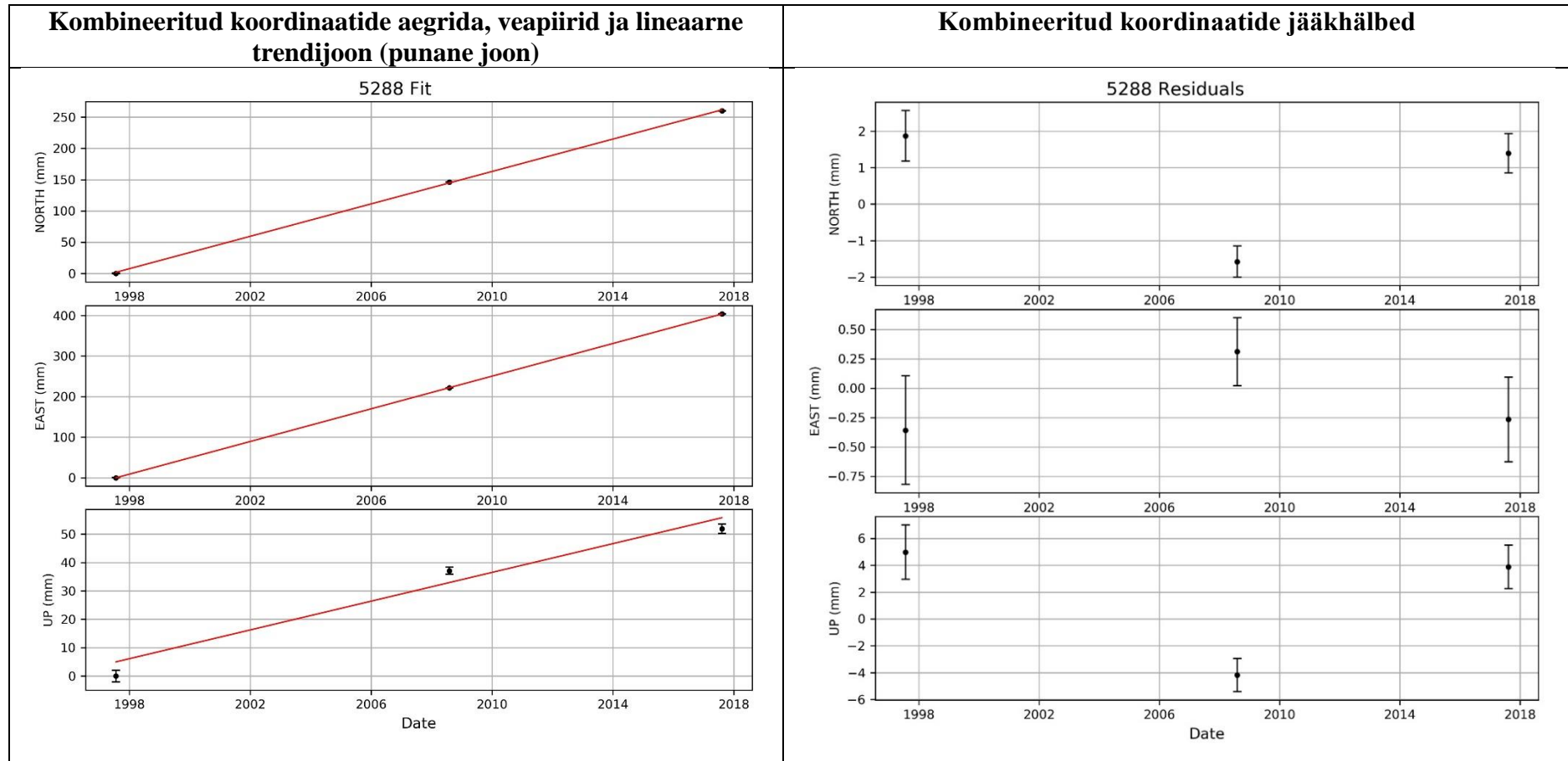
North– põhi, East- ida, Up- vertikaalsuund, Date- kuupäev



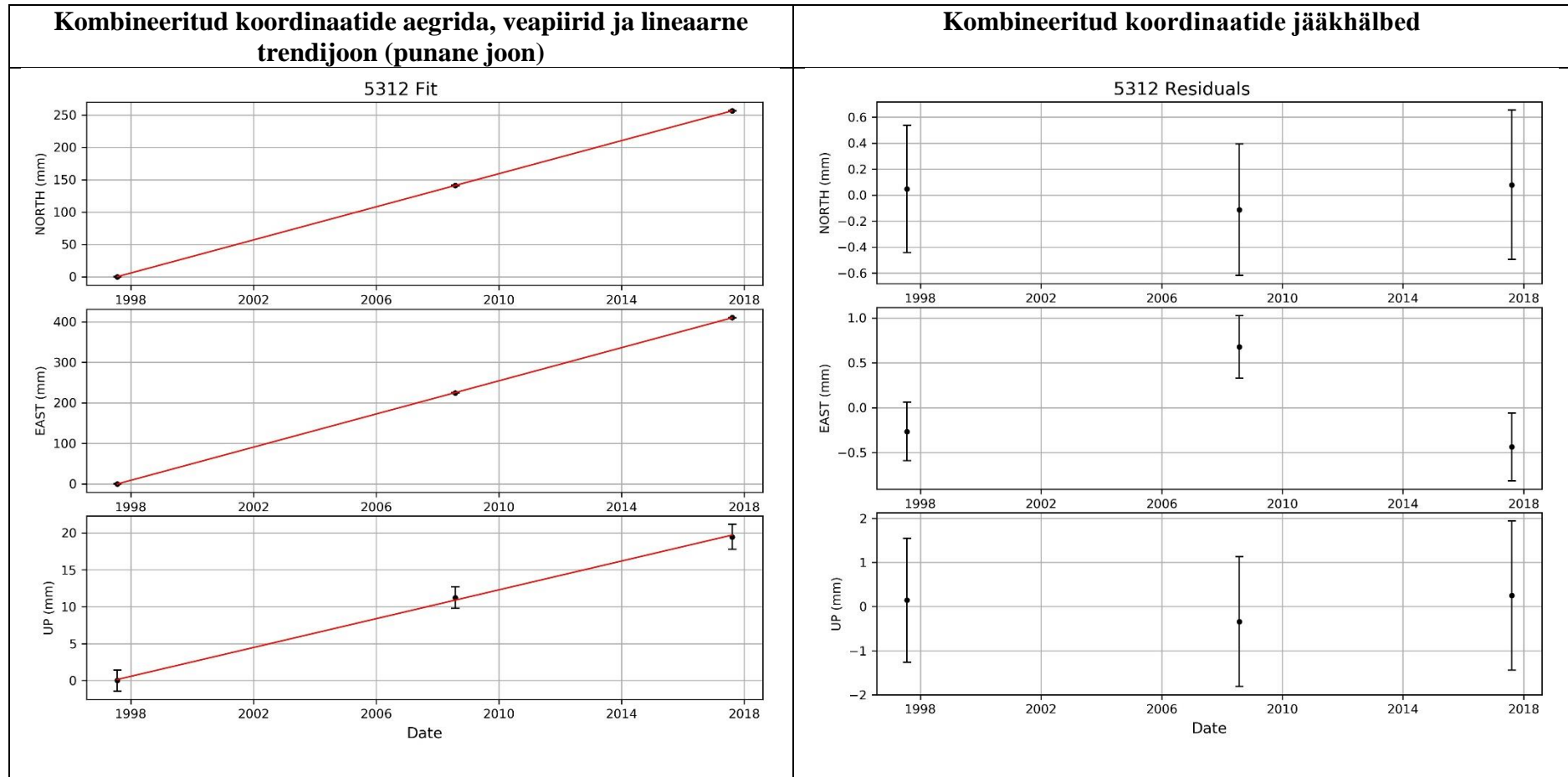
Lisa 4 järg



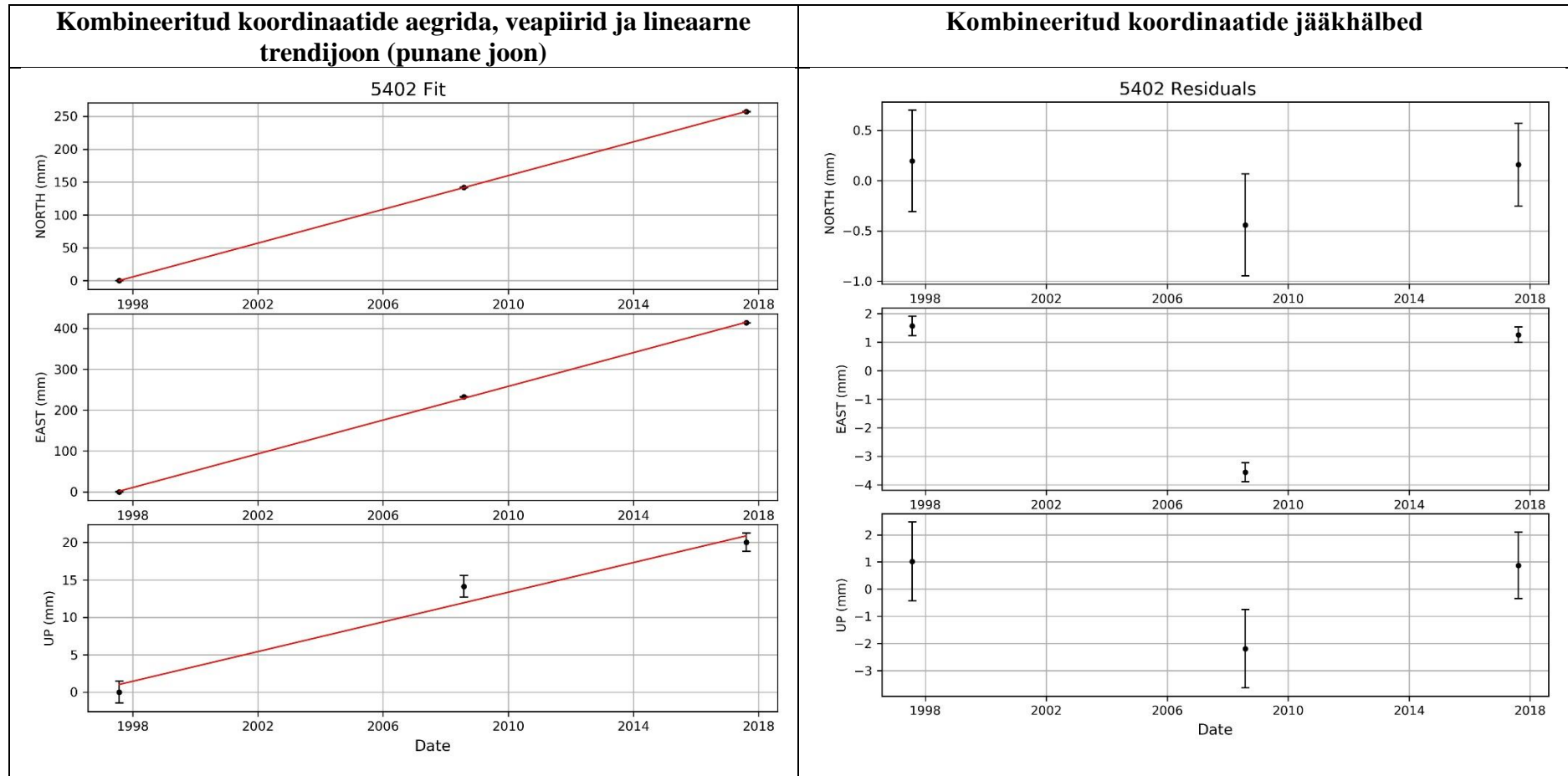
Lisa 4 järg



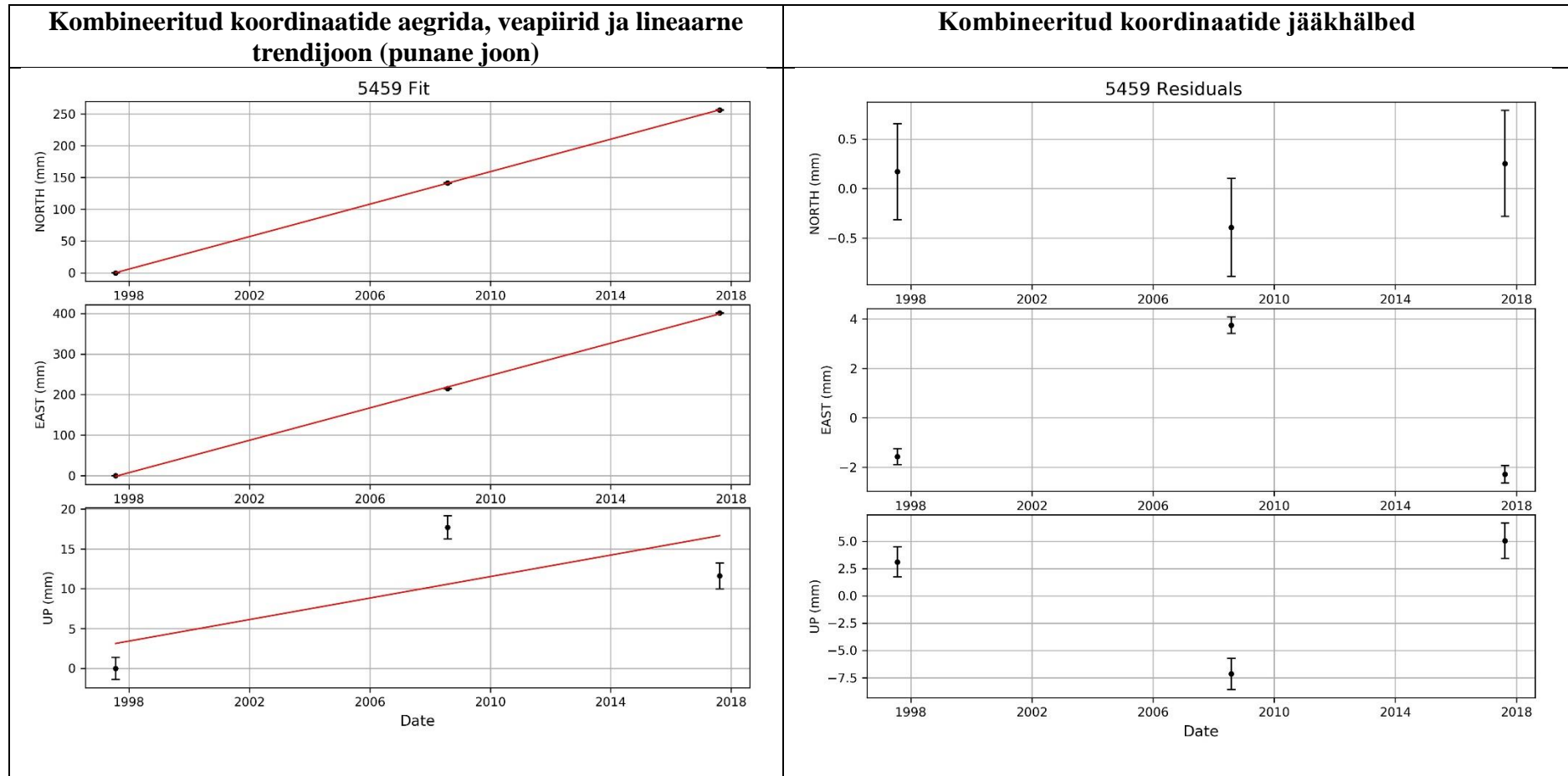
Lisa 4 järg



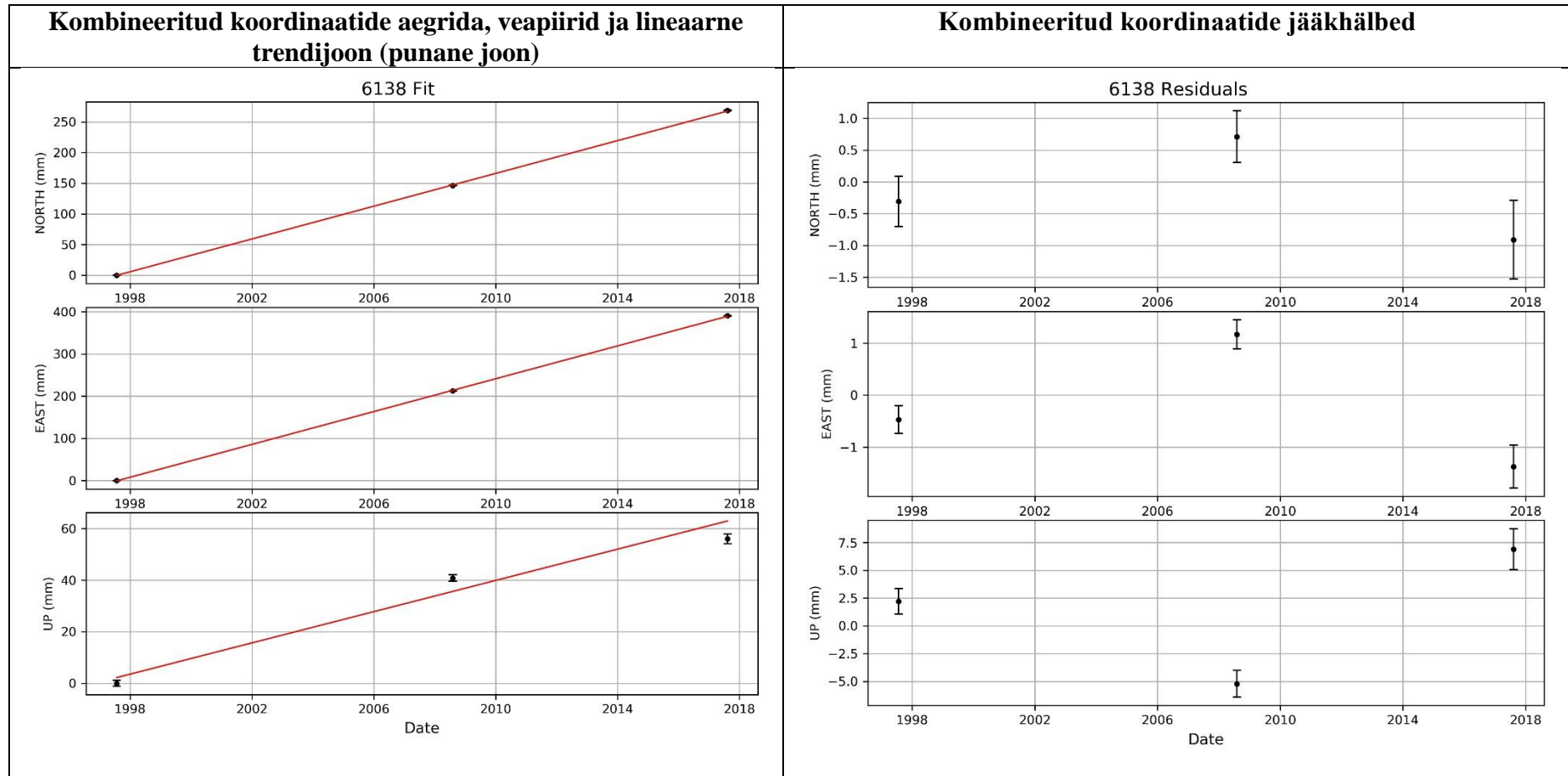
Lisa 4 järg



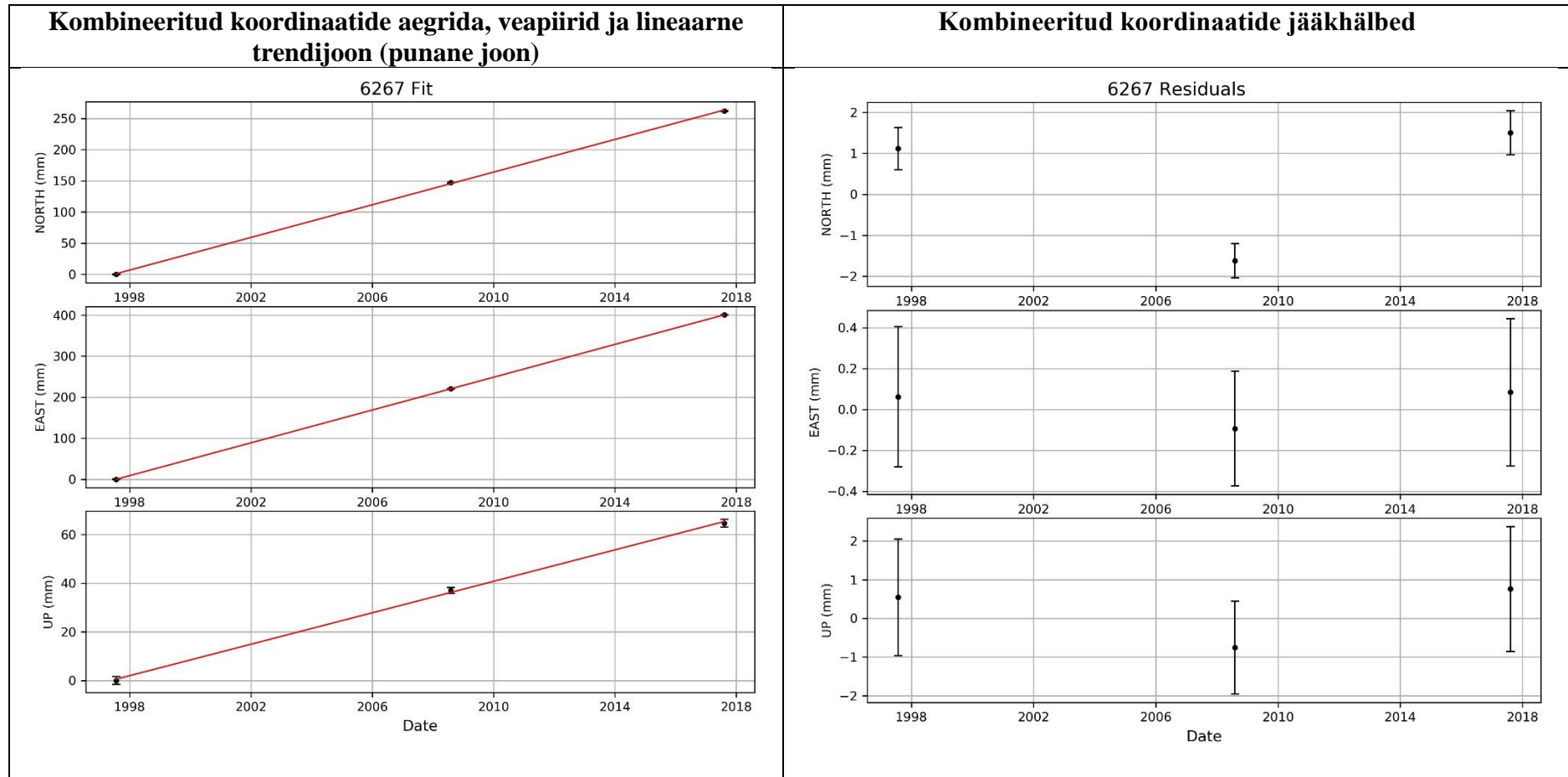
Lisa 4 järg



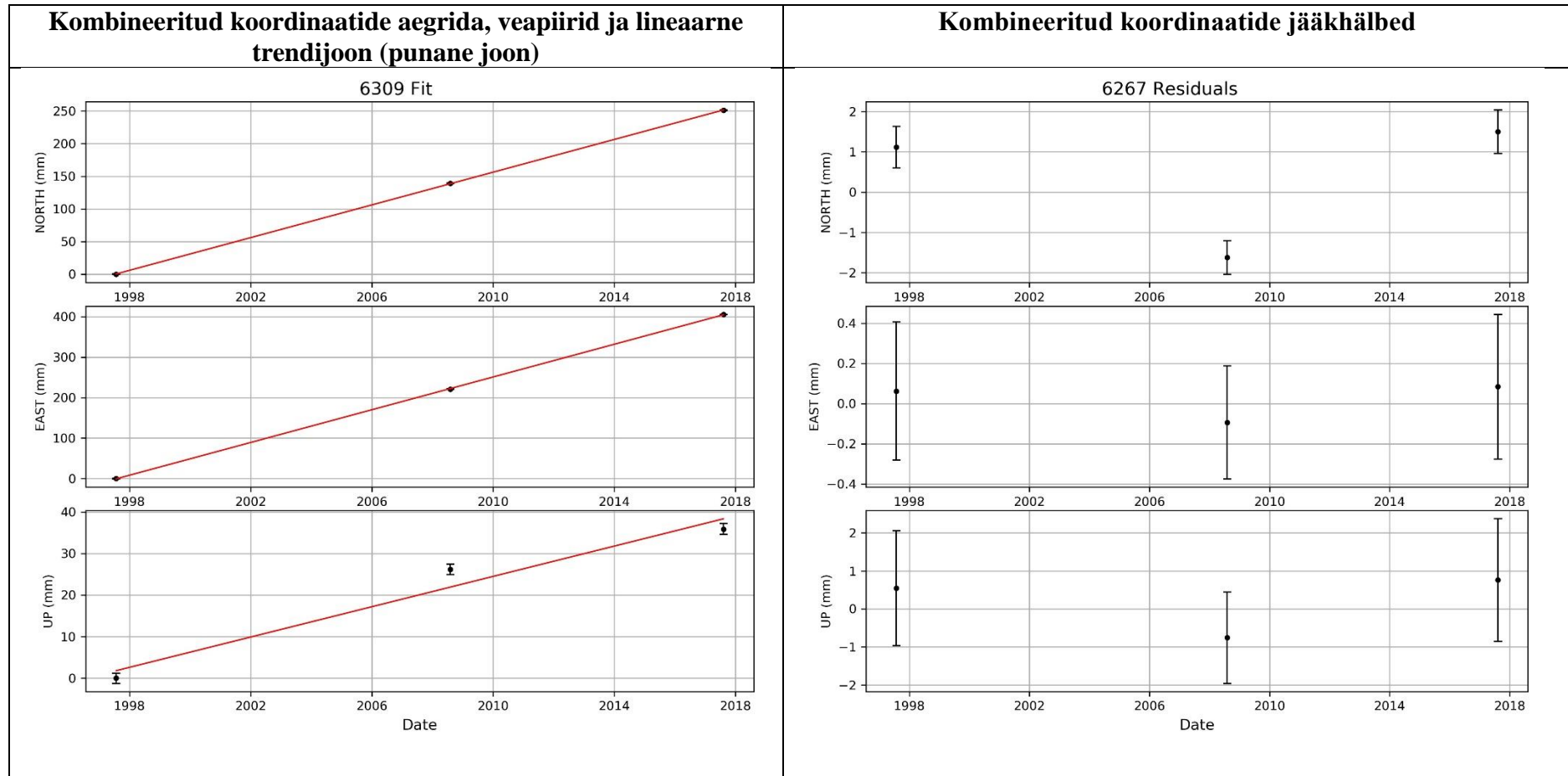
Lisa 4 järg



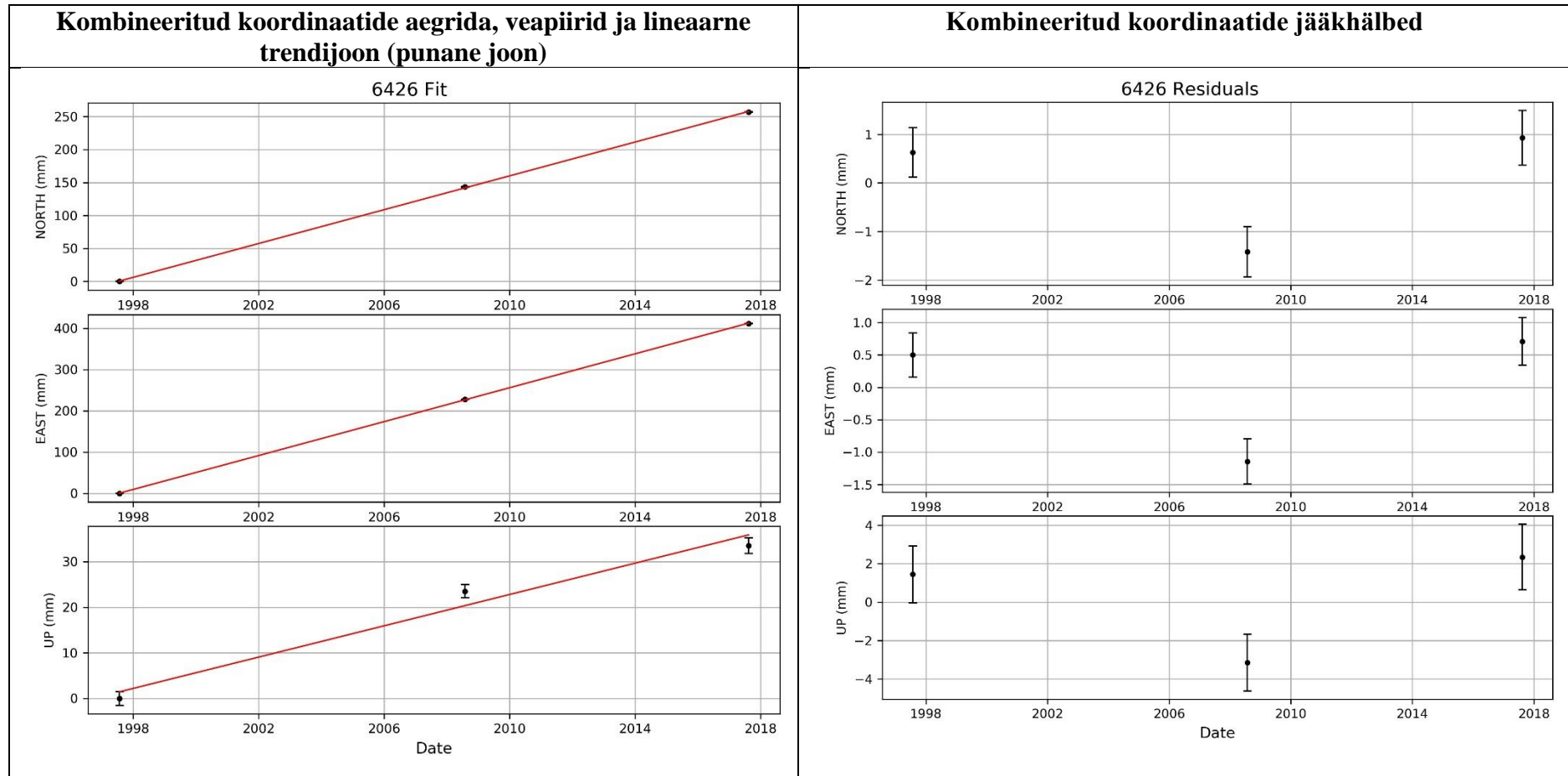
Lisa 4 järg



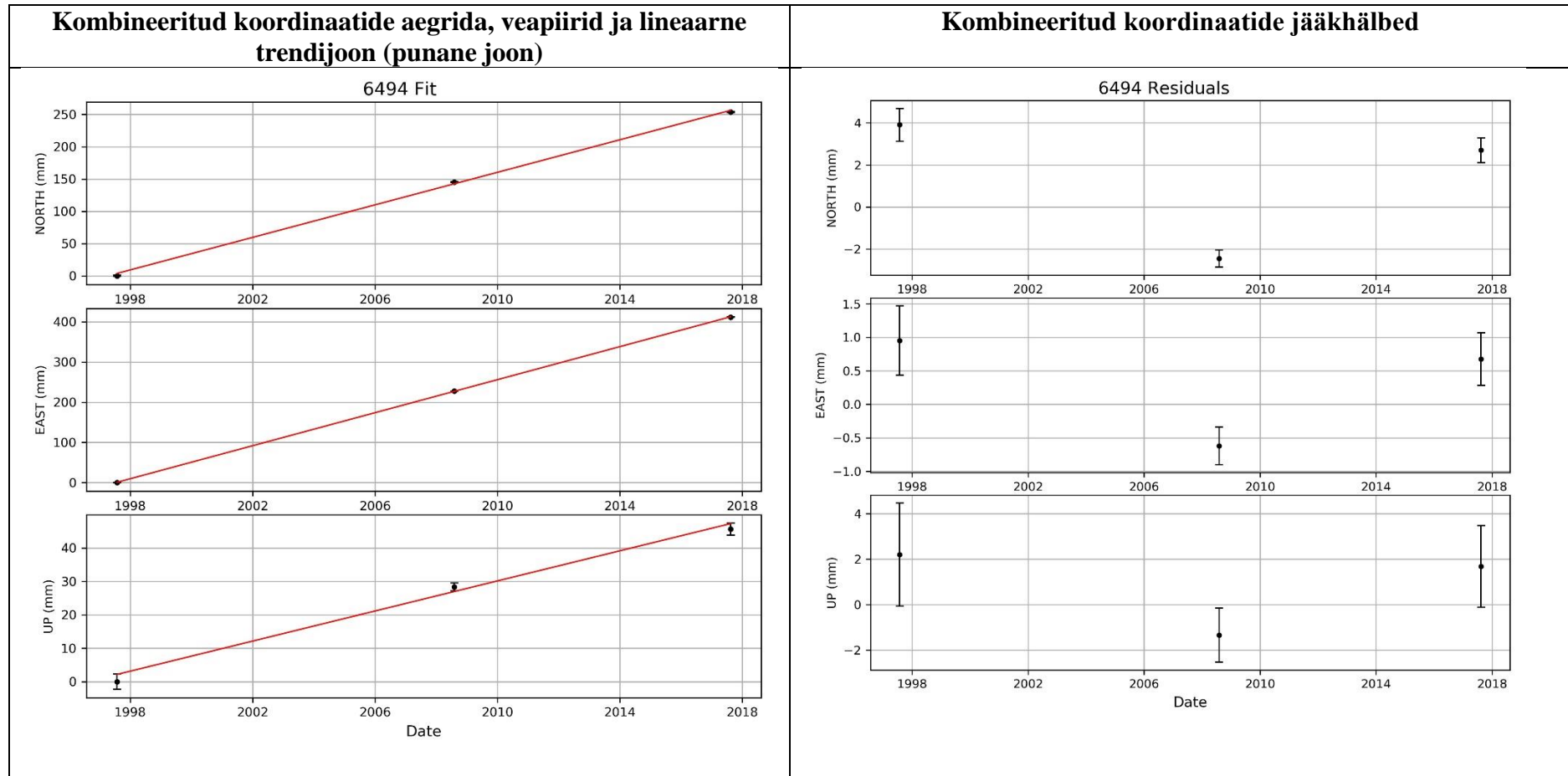
Lisa 4 järg



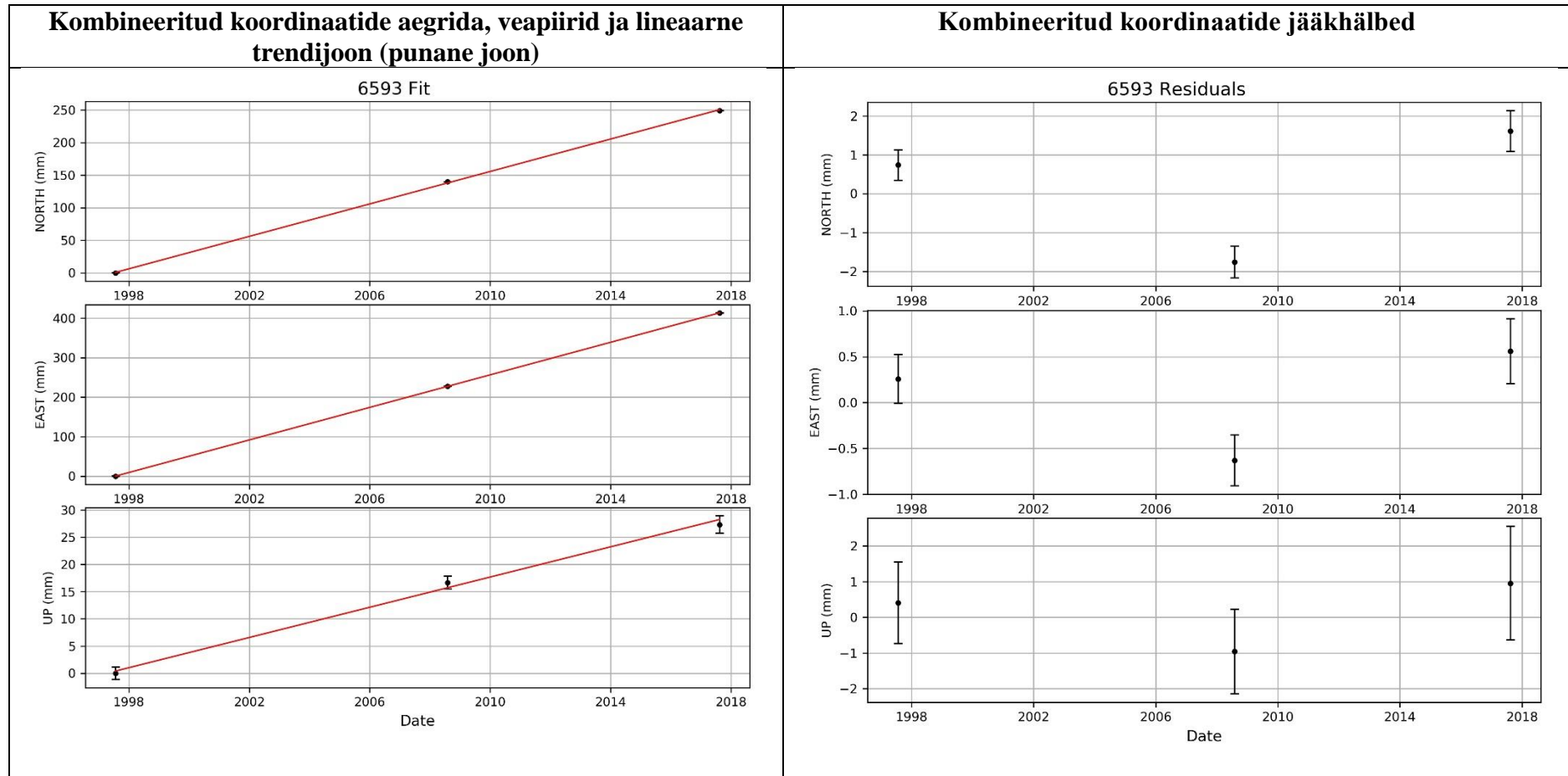
Lisa 4 järg



Lisa 4 järg



Lisa 4 järg



Lisa 5. Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide GNSS mõõtmiskampaaniate andmete põhjal arvutatud ruumilised geotsentrilised ristkoordinaadid ITRF2008 referentsraamistikus ja nende standardhälbed (m)

Punkt	Kampaania keskmine epohh	X	Standardhälve	Y	Standardhälve	Z	Standardhälve
4489	1997,56	3046876,302	0,001	1567046,353	0,000	5361953,976	0,001
	2008,59	3046876,094	0,001	1567046,500	0,001	5361954,058	0,001
	2017,61	3046875,924	0,001	1567046,619	0,001	5361954,122	0,001
5128	1997,56	3141475,595	0,001	1277730,904	0,000	5383712,547	0,001
	2008,59	3141475,404	0,001	1277731,054	0,000	5383712,645	0,001
	2017,61	3141475,248	0,001	1277731,186	0,001	5383712,718	0,001
5288	1997,56	3056335,598	0,001	1342150,367	0,001	5416702,520	0,002
	2008,59	3056335,412	0,001	1342150,527	0,000	5416702,628	0,001
	2017,61	3056335,257	0,001	1342150,658	0,001	5416702,700	0,001
5312	1997,56	3095518,371	0,001	1402529,011	0,000	5379277,018	0,001
	2008,59	3095518,175	0,001	1402529,168	0,001	5379277,103	0,001
	2017,61	3095518,013	0,001	1402529,299	0,001	5379277,171	0,002
5402	1997,56	3062740,709	0,001	1501881,146	0,001	5371353,306	0,001
	2008,59	3062740,506	0,001	1501881,305	0,001	5371353,394	0,001
	2017,61	3062740,341	0,001	1501881,427	0,000	5371353,460	0,001
5459	1997,56	2989696,427	0,001	1546969,273	0,001	5399407,985	0,001
	2008,59	2989696,230	0,001	1546969,413	0,001	5399408,075	0,001
	2017,61	2989696,055	0,001	1546969,533	0,001	5399408,130	0,001
6138	1997,56	3058937,047	0,001	1239946,364	0,000	5439393,042	0,001
	2008,59	3058936,870	0,001	1239946,522	0,000	5439393,152	0,001
	2017,61	3058936,713	0,001	1239946,651	0,001	5439393,228	0,002

Lisa 5 järg

Punkt	Kampaania aasta	X	Standardhälve	Y	Standardhälve	Z	Standardhälve
6267	1997,56	3003713,101	0,001	1306951,433	0,001	5454358,870	0,001
	2008,59	3003712,915	0,001	1306951,592	0,000	5454358,977	0,001
	2017,61	3003712,765	0,001	1306951,724	0,001	5454359,059	0,001
6309	1997,56	2995073,162	0,001	1440090,502	0,000	5425765,950	0,001
	2008,59	2995072,971	0,001	1440090,655	0,000	5425766,045	0,001
	2017,61	2995072,810	0,001	1440090,782	0,000	5425766,112	0,001
6426	1997,56	2952421,561	0,001	1492709,397	0,001	5434845,945	0,001
	2008,59	2952421,359	0,001	1492709,551	0,001	5434846,039	0,001
	2017,61	2952421,194	0,001	1492709,673	0,001	5434846,106	0,002
6494	1997,56	2905638,980	0,001	1448392,125	0,001	5471665,760	0,002
	2008,59	2905638,779	0,001	1448392,280	0,000	5471665,858	0,001
	2017,61	2905638,621	0,001	1448392,406	0,001	5471665,928	0,002
6593	1997,56	2871566,060	0,001	1534668,641	0,000	5466142,997	0,001
	2008,59	2871565,853	0,001	1534668,789	0,000	5466143,083	0,001
	2017,61	2871565,688	0,001	1534668,911	0,001	5466143,147	0,001

**Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Kätlin Kruusla,

(autori nimi)

sünniaeg 07.12.1994,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Maakoore liikumised riikliku geodeetilise võrgu GNSS kordusmõõtmistest,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Tarmo Kall (PhD),

(juhendaja nimi)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse
tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(allkiri)

Tartu, _____

(kuupäev)

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)